UNIVERSITE IBN ZOHR
FACULTE DES SCIENCES AGADIR

Filière : SMP | Section : 4

Module: Electronique Analogique

Chapitre 1 | Partie 2 : Applications de diodes

Pr. Khalid ASSALAOU

Plan

❑ Alimentation stabilisée

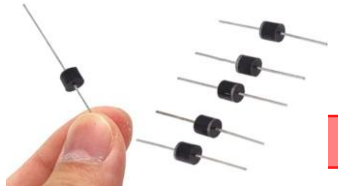
- Introduction
- Transformateur
- Redressement
  - Redressement mono-alternance
  - Redressement double-alternance
    - Pont de diode
    - À point médiane
- Filtrage
  - Calcul de la capacité en présence de la diode Zener
  - Calcul de la capacité en l'absence de la diode Zener
- Stabilisation de la tension par diode Zener
  - Stabilisation en amont
  - Stabilisation en aval

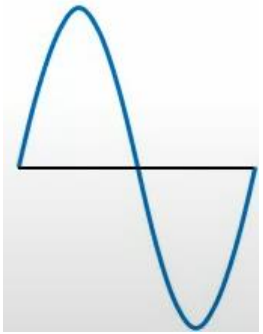
❑ Autres applications

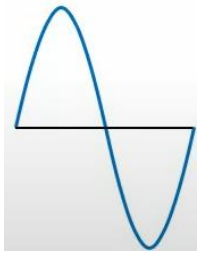
- Circuits limiteurs à diode (Ecrêtage de tension)
- Circuit de restauration (Décalage de tension)

Descriptif d'une alimentation stabilisée:

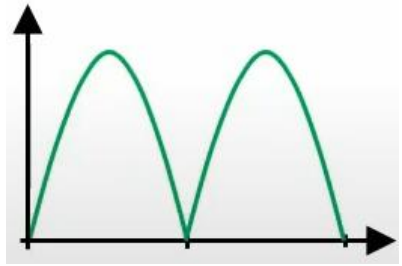
Tension réseau → Transformateur → Redresseur → Filtrage → Régulateur → Charge







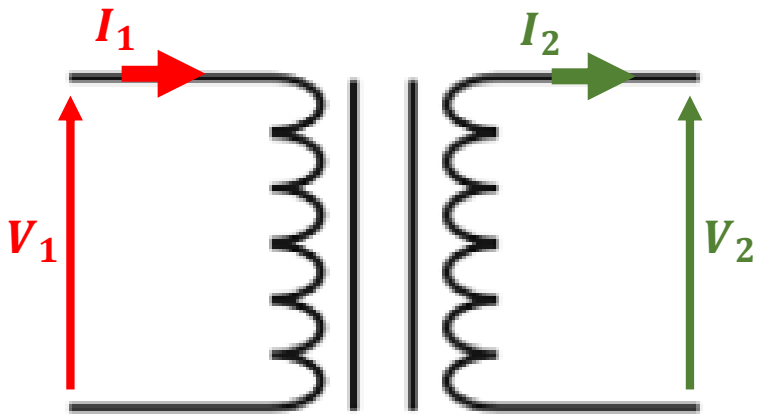
Tension alternative



Tension continue pulsée

Tension continue

❑ Transformateur



N_1 : *nombre de spires au primaire*

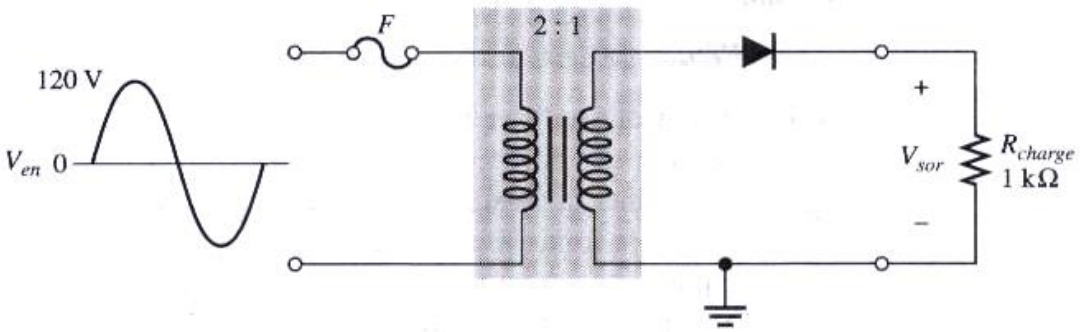
N_2 : *nombre de spires au secondaire*

m : *rapport de transformation*

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Exemple :

Déterminez la valeur maximale de la tension de sortie à la **figure** ci-jointe.



Solution

La tension maximale au secondaire est :

$$V_{max(sec)} = \left(\frac{N_{sec}}{N_{pri}}\right) \cdot V_{max(pri)} = 0,5 \cdot (120\,V) = 60\,V$$

La tension maximale redressée à la sortie est :

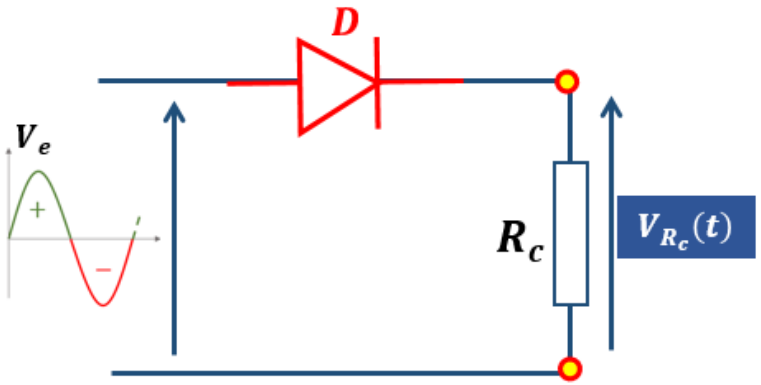
$$V_{max(sor)} = V_{max(sec)} - 0,7\,V = 60\,V - 0,7\,V = 59,3\,V$$

où $V_{max\,(sec)}$ est l'entrée vers le redresseur.

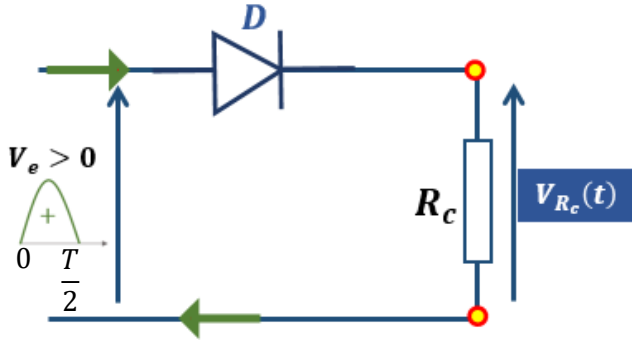
$$V_{max\,(pri)} = V_{max(en)} = 120\,V$$

Redressement

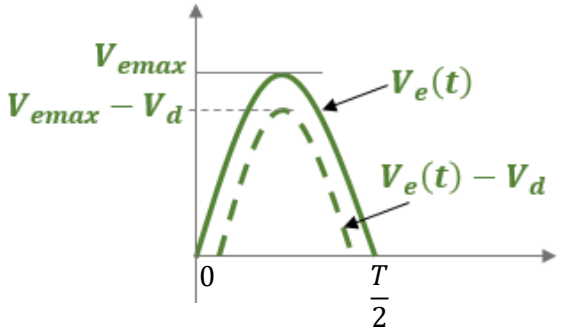
❑ Redressement mono alternance



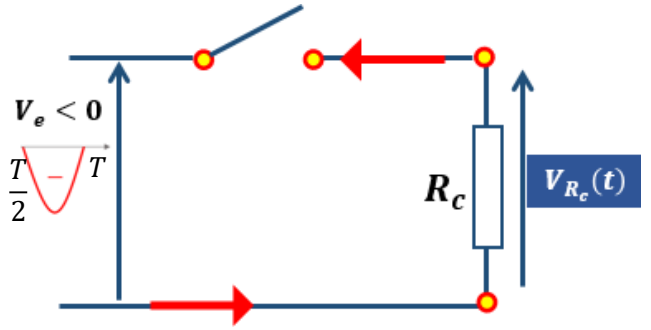
Pendant l'alternance Positive(+)



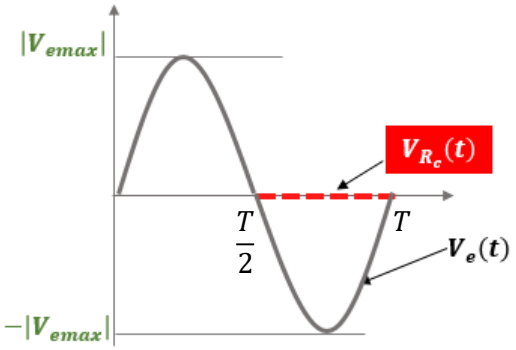
$$V_{R_c} = V_e(t) - V_d$$

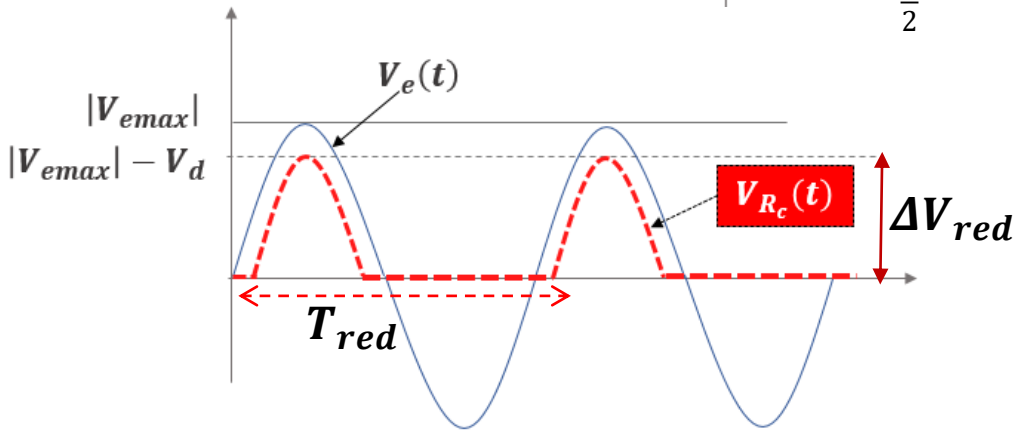


Pendant l'alternance négative(-)



$$V_{R_c} = 0$$





❖ **Fréquence du signal redressé (double alternance) :**

$$T_{red} = T_e$$

❖ **Amplitude des ondulation à la sortie du redresseur:**

$$\Delta V_{red} = (V_{emax} - V_d) - V_{emin}, (V_{emin} = 0V)$$

❑ Redressement mono alternance

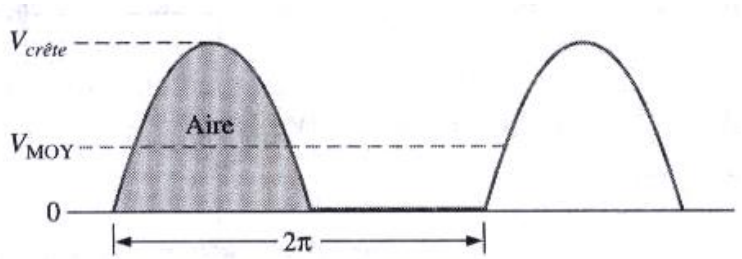
Valeur moyenne de la tension de sortie à simple alternance

V_{MOY} de tension de sortie d'un redresseur simple alternance :

Modèle de diode **idéal** : **Mesure** avec **voltmètre en position c.c.**
V_{MOY} : **Aire** sous la courbe pour un cycle complet /π.

$$V_{MOY} = \frac{V_{crête}}{\pi}$$

où $V_{crête}$ est la valeur crête(max) de la tension.



Valeur moyenne d'un redressement simple alternance.

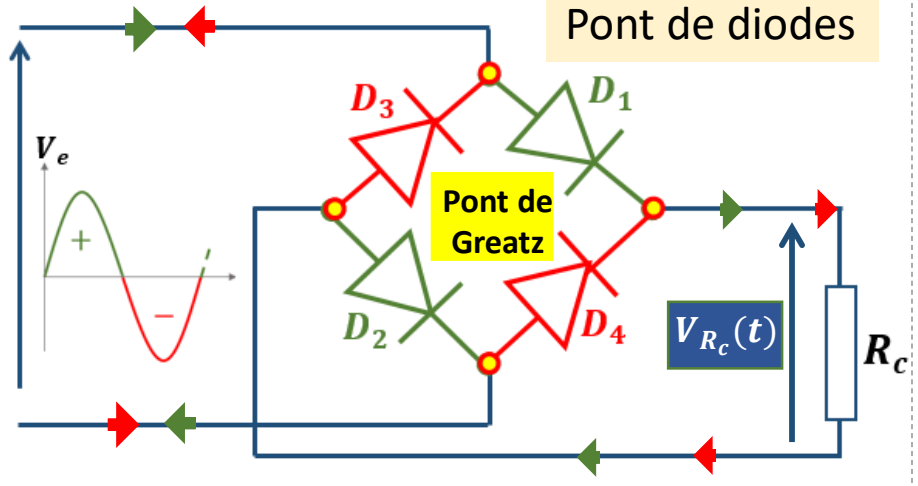
Exemple :
Quelle est la valeur moyenne de la tension de sortie du signal redressé simple alternance illustré à la **figure** ci-dessous ?

Solution

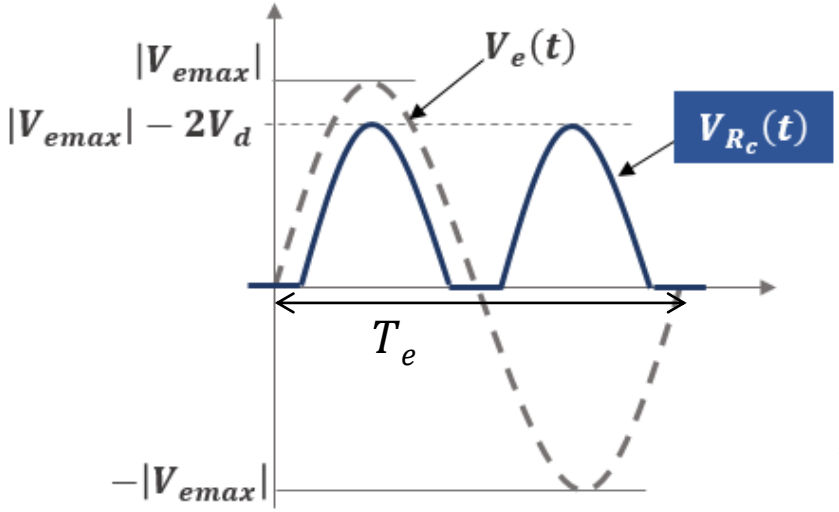
$$V_{MOY} = \frac{V_{crête}}{\pi} = \frac{100}{\pi} = 31,8\ V$$

❑ Redressement double alternance

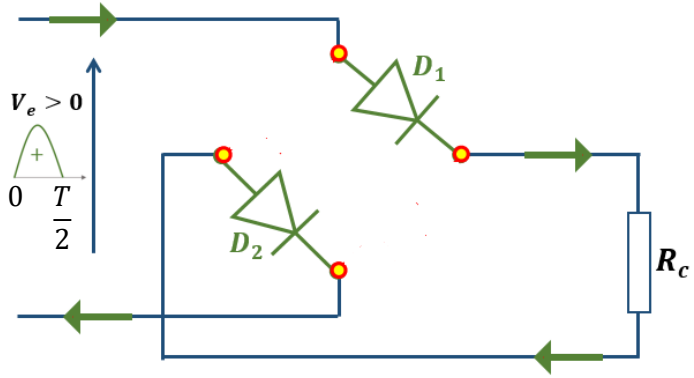
Pont de diodes



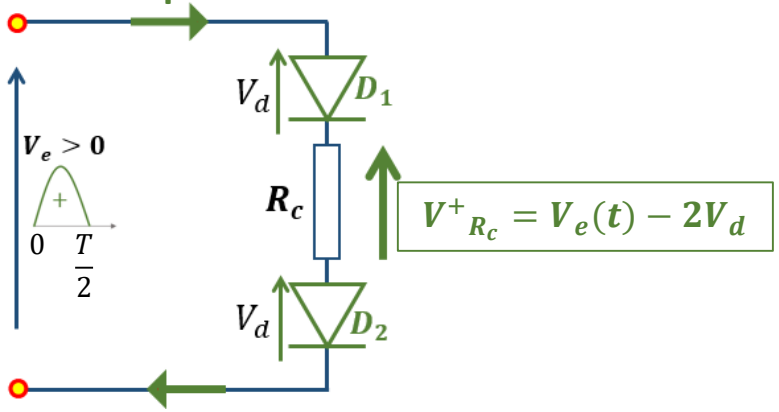
$$V_{R_c} = \begin{cases} V_e - 2V_d & 0 < t < T/2 \\ -V_e - 2V_d & T/2 < t < T \end{cases}$$

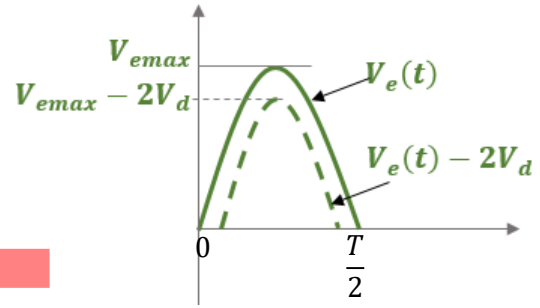


Pendant l'alternance Positive(+)

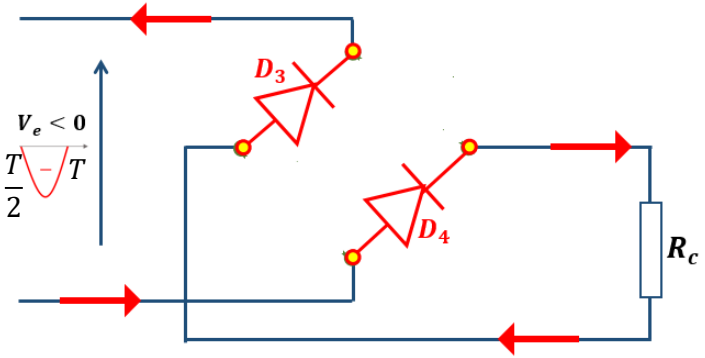


Circuit équivalent:

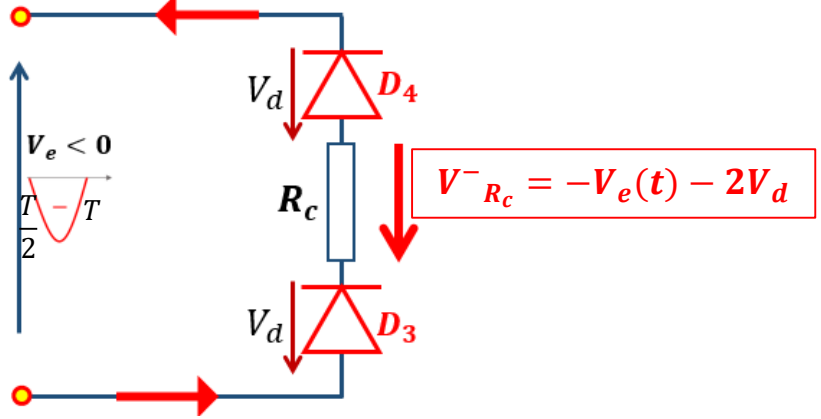


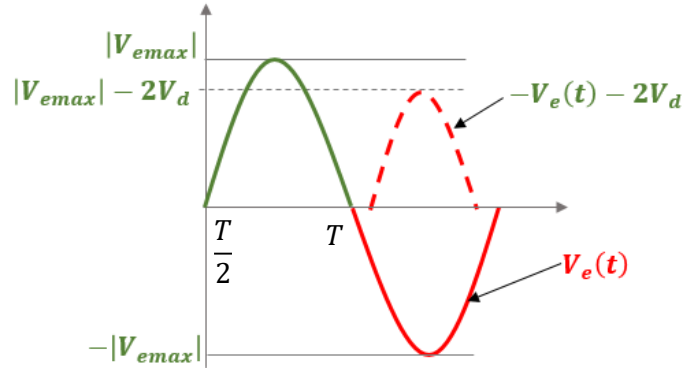


Pendant l'alternance négative(-)



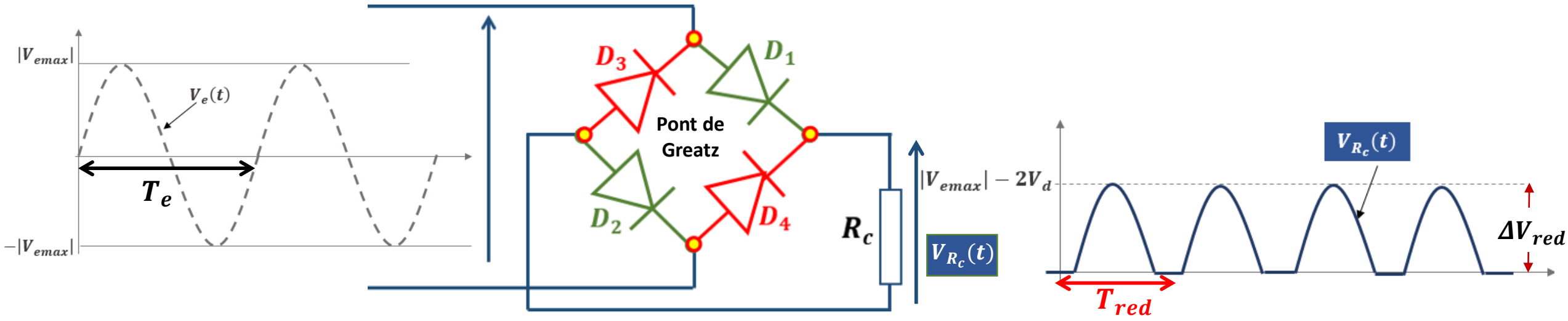
Circuit équivalent:





❑ Redressement double alternance

Pont de diodes



Fréquence du signal redressé (double alternance) : $T_{red} = \frac{T_e}{2}$ $\Rightarrow f_{red} = 2f_e$

Amplitude des ondulation à la sortie du redresseur: $\Delta V_{red} = (V_{emax} - 2V_d) - V_{emin}$ $\Rightarrow \Delta V_{red} = V_{emax} - 2V_d$

V_{MOY} = **Double** de la valeur de la tension **simple alternance**. $V_{MOY} = \frac{2V_{max}}{\pi}$

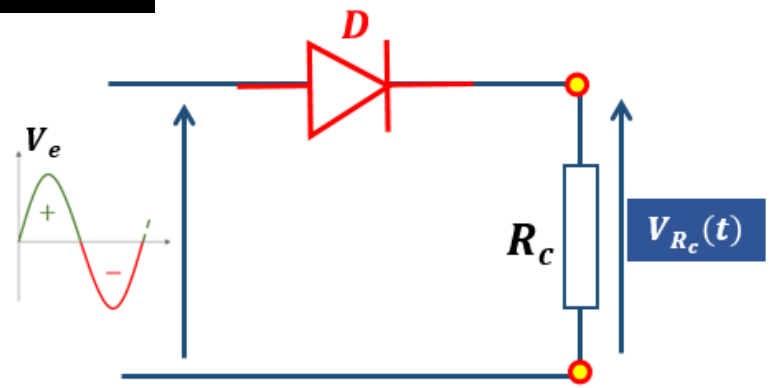
Exemple:
Trouvez valeur moyenne de tension de sortie redressée double alternance de la **fig.** suivante

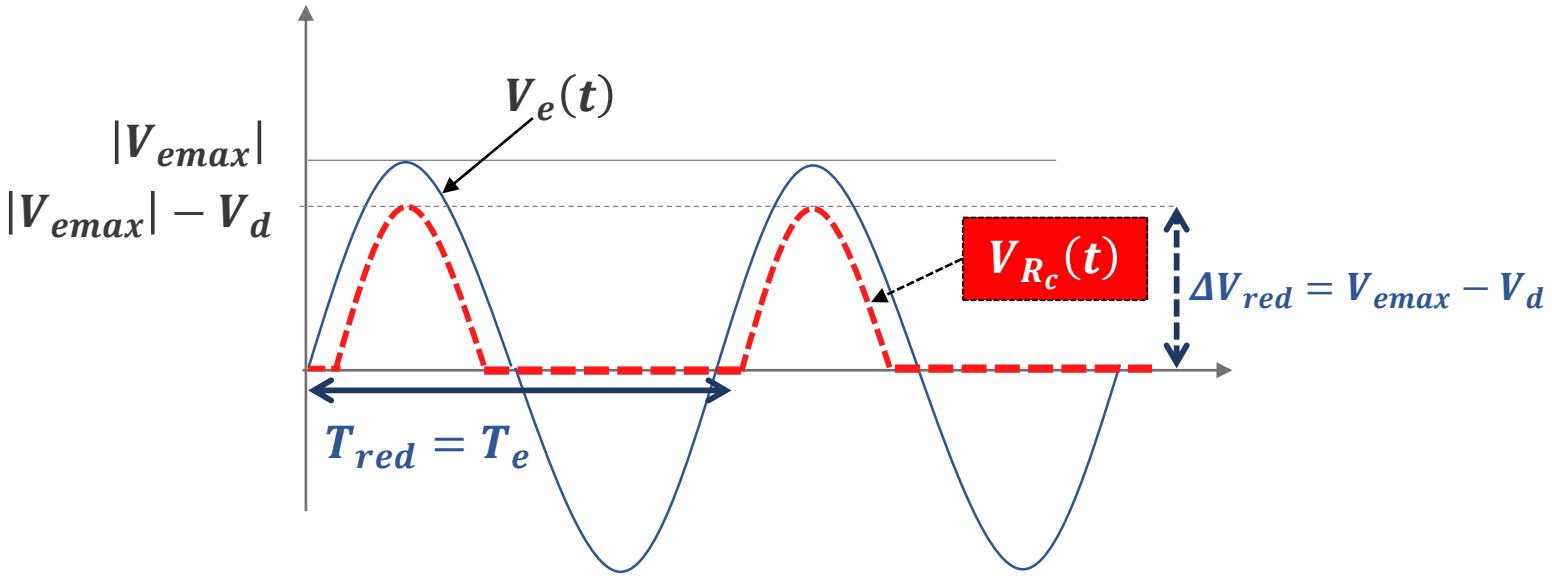
Solution

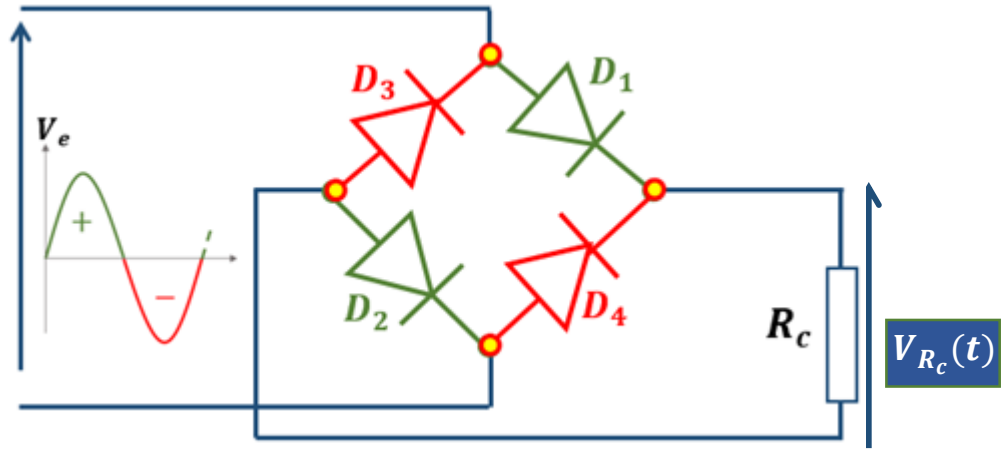
$$V_{MOY} = \frac{2V_{crête}}{\pi} = \frac{2.(15)}{\pi} = 9,55V$$

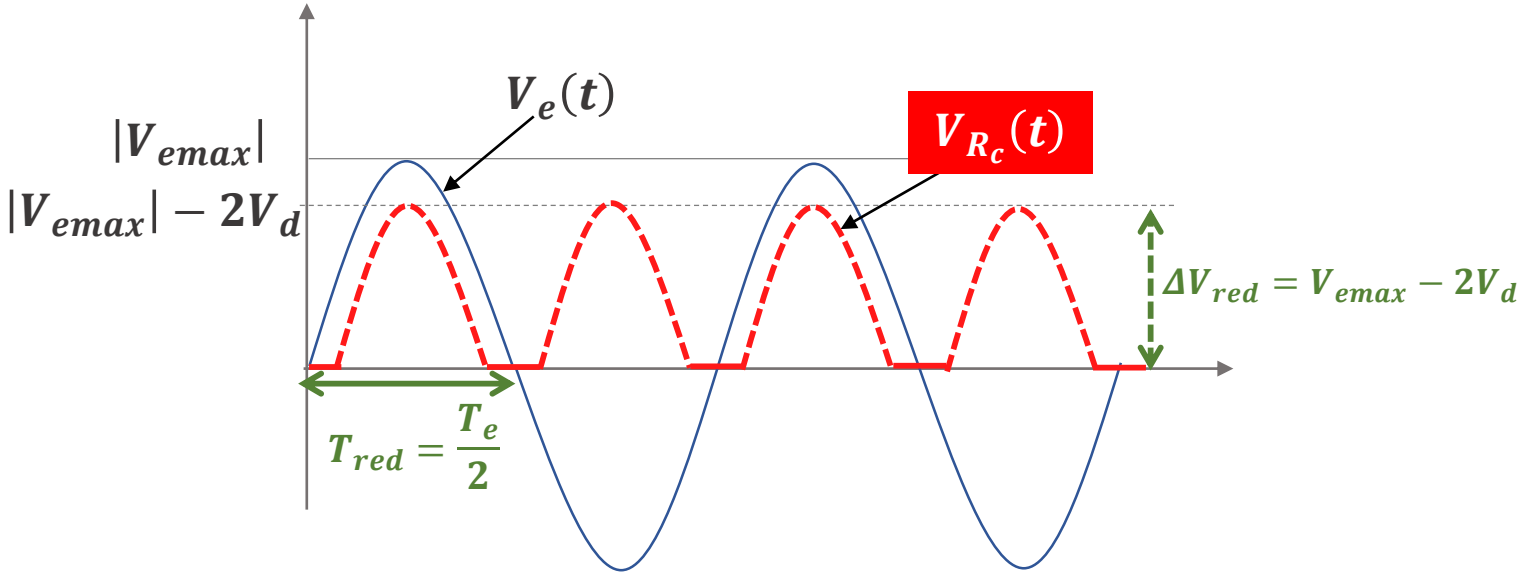
❑ Redressement double alternance

Synthèse









❑ Redressement double alternance

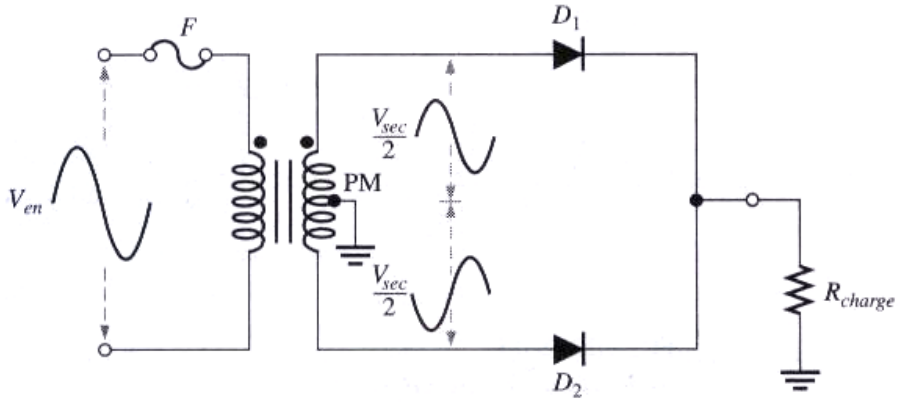
Redresseur double alternance à prise médiane

Si la **tension alternative totale du secondaire** est V_{sec} (valeur de crête crête-à-crête), alors **chaque demi-enroulement** du transformateur fournit une tension de crête de : $V_{sec}/2$

Cela signifie que :

Lors de la **demi-alternance positive**, la borne supérieure du secondaire est à $V_{sec}/2$ et la prise médiane est la référence (**0V**).

Lors de la **demi-alternance négative**, la borne inférieure est à $-V_{sec}/2$ et la prise médiane reste la référence.



Durant le **1° demi-cycle** → Polarisation **Directe** pour la diode **D_1** et **Inverse** pour **D_2**.

⇒ **Courant s'achemine à travers D_1** et la résistance de charge **R_{charge}**.

Durant le **2° demi-cycle** → **Polarisation Inverse** pour **D_1** et **Directe** pour **D_2**.

⇒ **Courant s'achemine à travers D_2** et la résistance **R_{charge}**.

⇒ **Courant** traverse charge **dans même direction** durant **2 alternances du cycle d'entrée.**

⇒ Tension de sortie **produite aux bornes de charge est continue redressée double alter.**

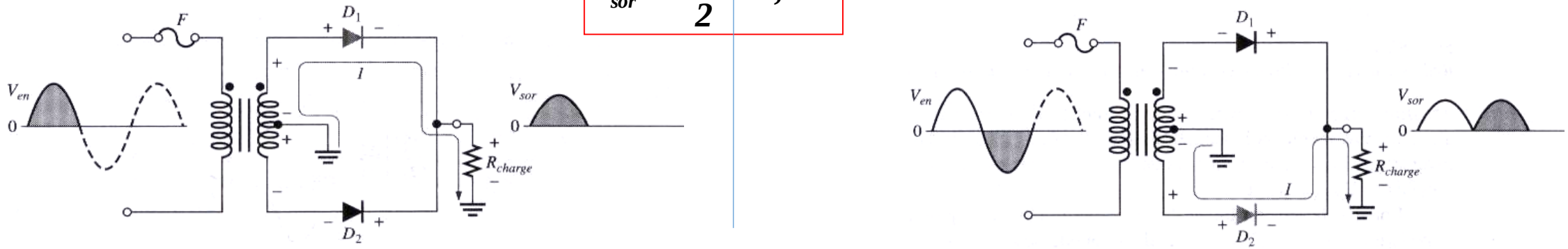
❑ Redressement double alternance

Redresseur double alternance à prise médiane

a) Pendant les **demi-cycles positifs**, D_1 est sous **polarisation directe**, D_2

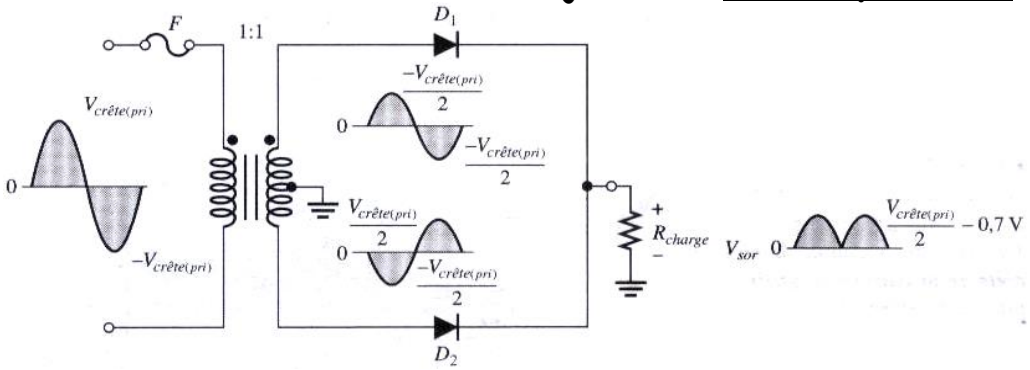
$$V_{sor} = \frac{V_{sec}}{2} - 0{,}7\,V$$

b) Pendant les **demi-cycles négatifs**, D_2 est sous **polarisation directe**, D_1 sous **polarisation inverse**.



Fonctionnement de base d'un redresseur double alternance à prise médiane.

Courant traversant résistance de **charge** est dans **même direction** durant **tout le cycle** de la tension d'entrée ⇒ **Tension de sortie** a donc toujours la **même polarité**.



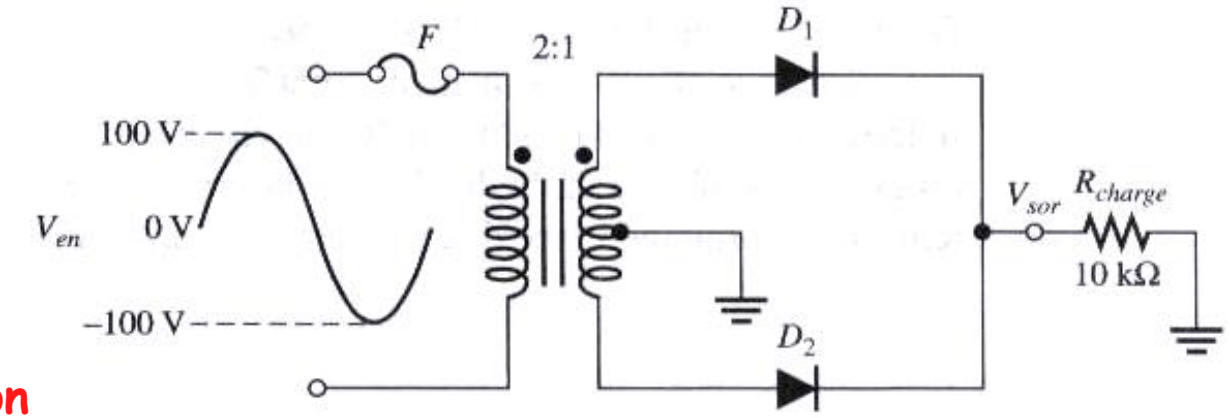
Redresseur double alternance à prise médiane avec un rapport de transformation de 1.

❑ Redressement double alternance

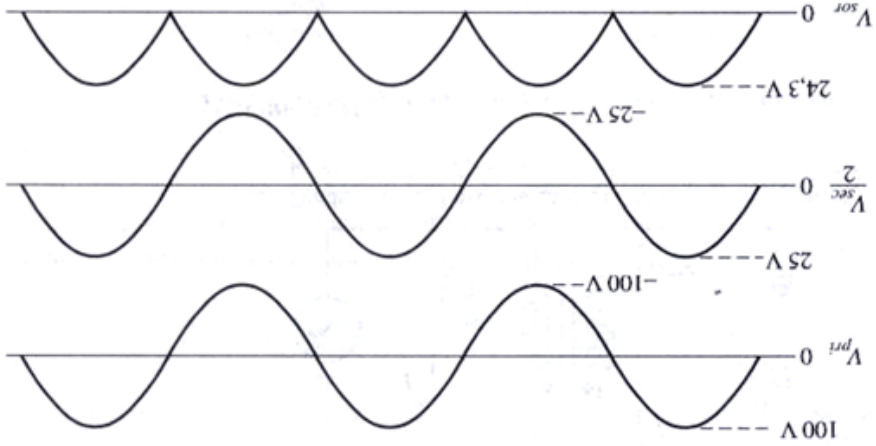
Redresseur double alternance à prise médiane

Exemple:

Indiquez les formes d'onde de la tension à travers le bobinage secondaire et aux bornes de R_{charge} lorsqu'une onde de **100 V** crête est appliquée au bobinage primaire de la **figure** ci-dessous.



Solution



Les formes d'ondes sont illustrées à la **figure**

Filtrage

1. Introduction au filtrage par condensateur
    a. Définition du filtrage
    b. Objectif du condensateur dans un redresseur
2. Influence du type de redressement sur l'ondulation
    a. Redressement simple alternance vs. double alternance
    b. Impact sur l'amplitude et la fréquence de l'ondulation
3. Calcul de la capacité du condensateur
    1. Calcul de la capacité du condensateur sans diode Zener
    2. Calcul de la capacité du condensateur avec diode Zener

❑ Filtrage

a. Définition du filtrage

Après un redressement (simple ou double alternance), la tension obtenue n'est pas parfaitement continue : elle présente une ondulation, c'est-à-dire des variations périodiques de tension. Pour lisser cette tension et la rapprocher d'une tension continue idéale, un condensateur est ajouté en parallèle avec la charge.

Le principe du filtrage repose sur la **capacité du condensateur à se charger et se décharger** :

•Lors de la phase où la tension redressée augmente, le condensateur se **charge** jusqu'à la valeur maximale de la tension.

•Lorsque la tension redressée diminue, le condensateur se **décharge** progressivement pour maintenir une tension plus stable aux bornes de la charge.

Ce processus réduit considérablement l'ondulation de la tension et permet d'obtenir une tension plus proche d'une tension continue.

❑ Filtrage

2. Objectif du Filtrage

L'objectif principal du filtrage est de **réduire l'ondulation** de la tension issue du redressement afin d'obtenir une alimentation plus stable pour les circuits électroniques. Une tension redressée non filtrée présente des variations importantes qui peuvent entraîner :

- **Des perturbations** dans le fonctionnement des circuits sensibles,
- **Une mauvaise régulation** de la tension d'alimentation,
- **Des performances dégradées** pour les composants électroniques alimentés.

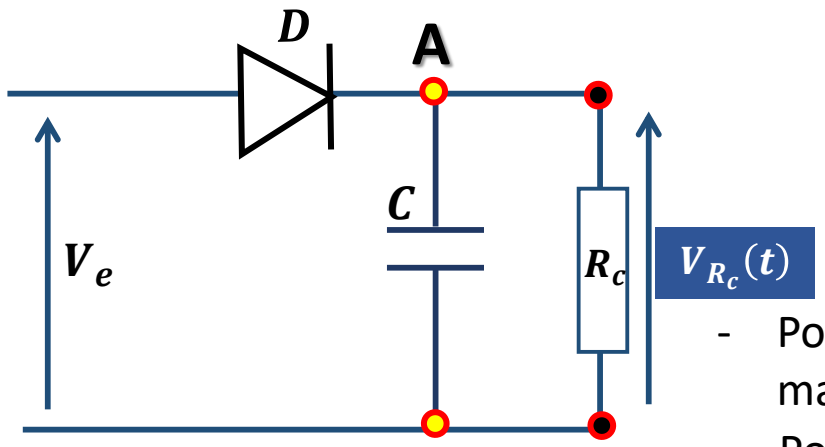
Le condensateur joue donc un rôle essentiel en assurant une **tension plus stable et plus continue** aux bornes de la charge. Plus la capacité du condensateur est grande, plus la réduction de l'ondulation est efficace.

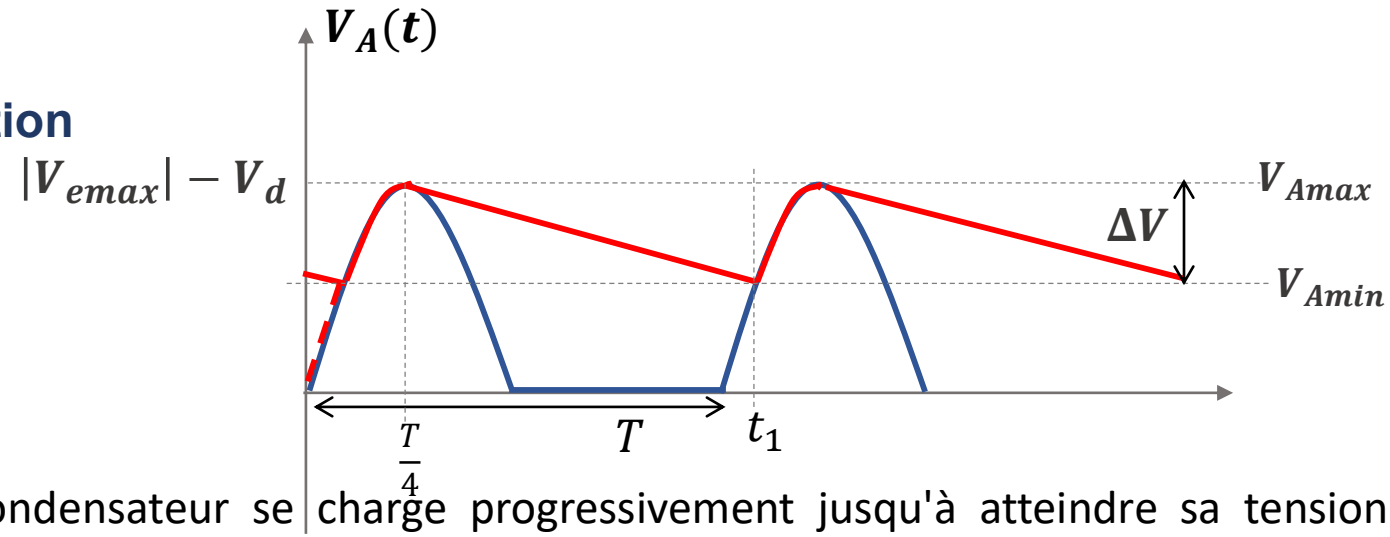
En résumé, le filtrage par condensateur permet :

✓ De **lisser** la tension redressée,
✓ De **réduire** l'amplitude de l'ondulation,
✓ D'**améliorer** la qualité de l'alimentation électrique du circuit.

❑ Filtrage

3. Influence du type de redressement sur l'ondulation





- Pour t<T/4, le condensateur se charge progressivement jusqu'à atteindre sa tension maximale, alimenté par la tension du redresseur.
- Pour T/4 < t <t_1 : le condensateur commence à se décharger et alimente la charge en énergie. Il continue à se décharger jusqu'à ce que la tension du redresseur devienne supérieure à VC, permettant ainsi une nouvelle recharge du condensateur.

- **Pendant l'alternance (+):**

la diode est passante ($V_D = V_e - V_{ci} > 0$) $V_{ci} = 0V$, Le condensateur est initialement déchargé

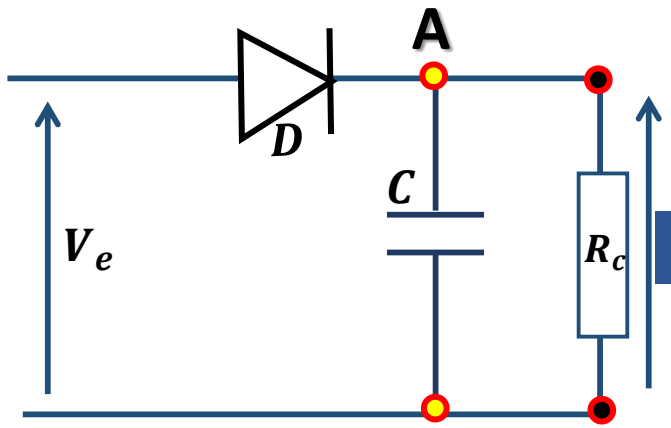
Le condensateur se charge atteint son maximum à t = $\frac{T}{4}$: $V_c\left(t = \frac{T}{4}\right) = V_{cmax} = V_{emax} - 2V_d$

- **Pendant l'alternance (-) :**

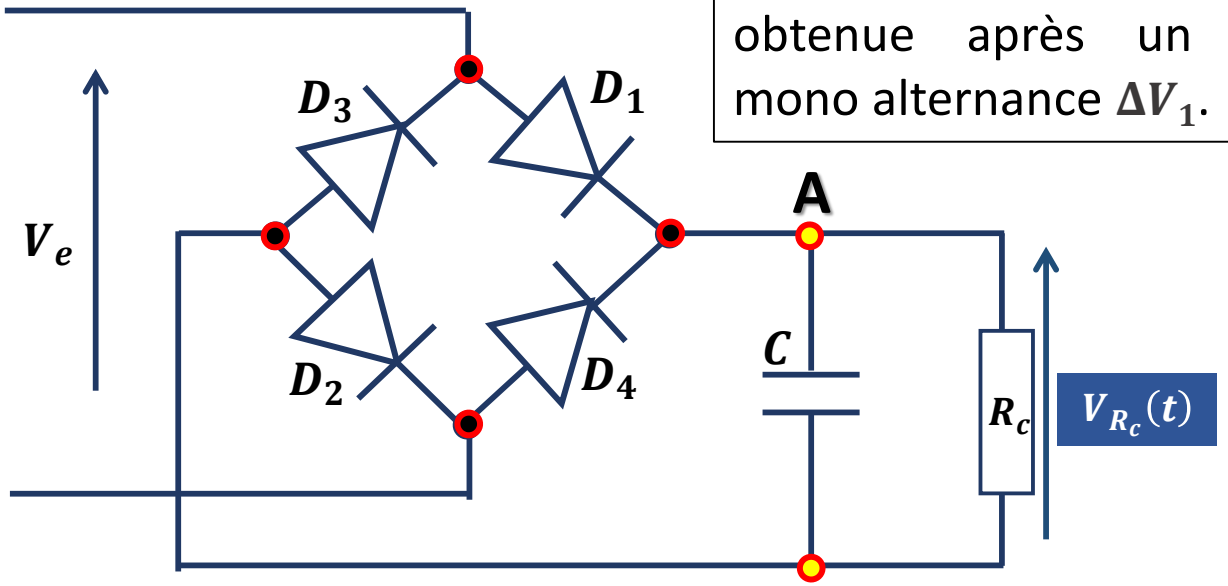
la diode est bloquée ($V_D = V_e - V_{cmax} < 0$) ⟹Le condensateur se décharge et alimente ainsi la charge

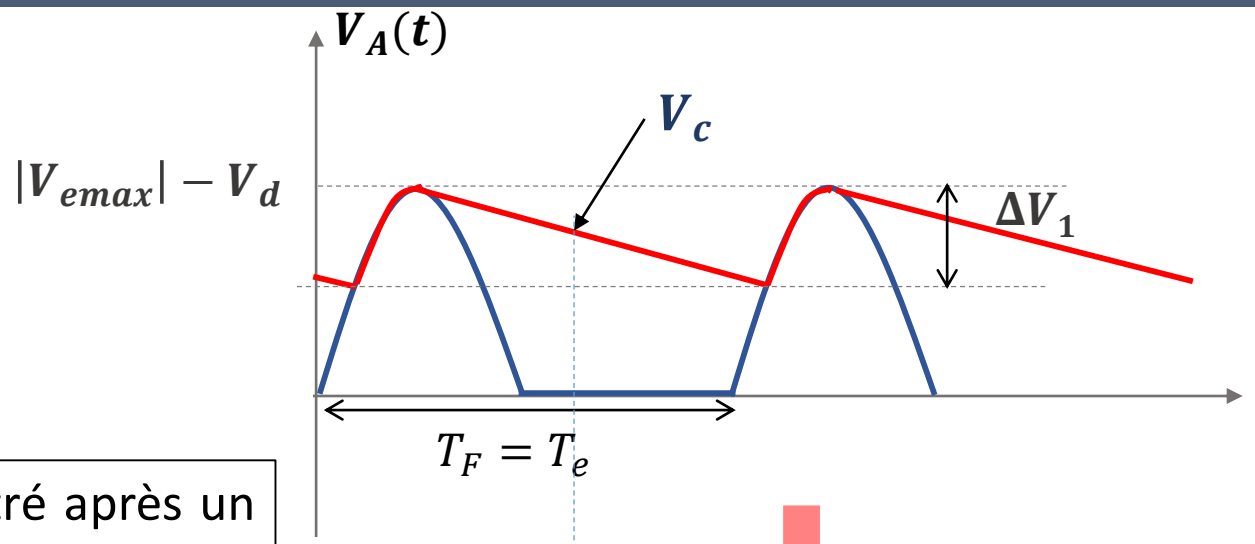
❑ Filtrage

3. Influence du type de redressement sur l'ondulation

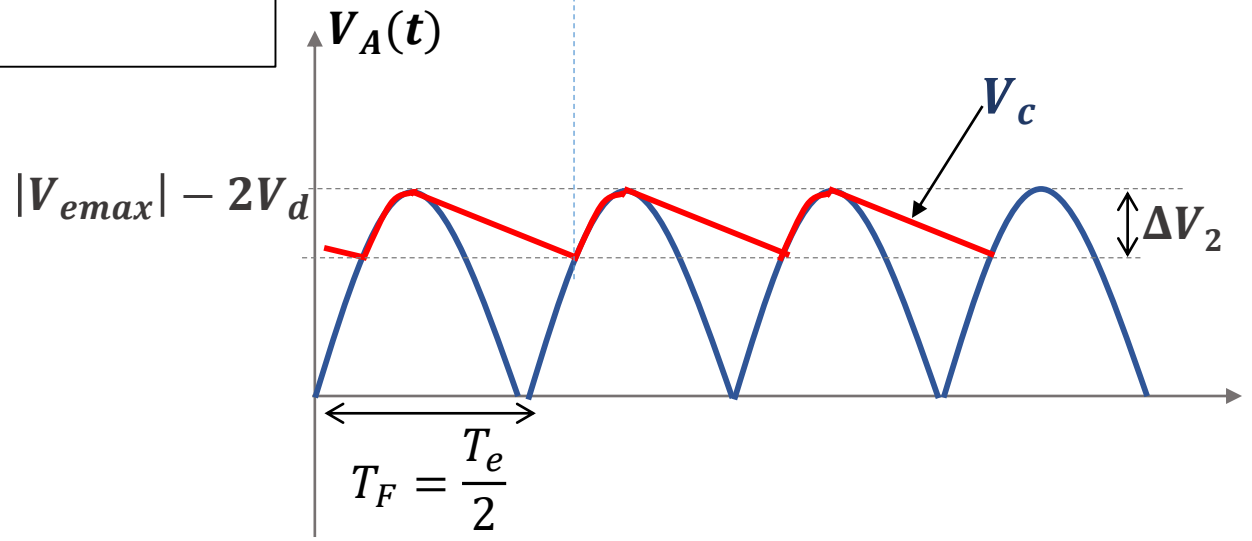


L'ondulation du signal filtré après un redressement double alternance ΔV_2 est réduite par rapport à celle obtenue après un redressement mono alternance ΔV_1.





L'amplitude de l'ondulation diminue



❑ Filtrage

▪ Calcul de la capacité sans diode Zener

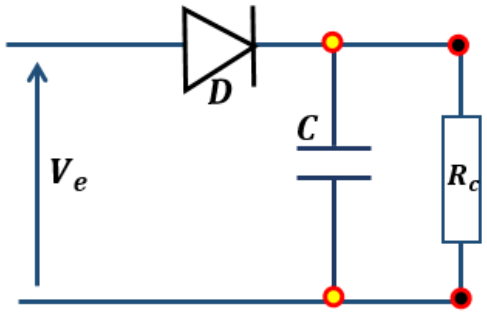
Lorsque le condensateur atteint sa tension maximale, il prend en charge l'alimentation de la charge électrique. Pendant ce temps, le pont de diodes cesse de conduire, car la tension du condensateur est supérieure à celle fournie par le redresseur.

Pour dimensionner correctement le condensateur, on suppose qu'il se décharge à courant constant. Le courant utilisé dans ce calcul correspond à la valeur maximale du courant consommé par la charge, moyennée sur une période du secteur. Cette approximation permet d'évaluer l'ondulation de tension et de choisir une capacité adaptée pour assurer une alimentation stable.

Avec ces hypothèses, le calcul du condensateur devient très simple : On considère que le condensateur $\boldsymbol{C}$ se décharge à courant $\boldsymbol{I_{max}}$ constant pendant un temps $\boldsymbol{\Delta T}$ (est la durée pendant laquelle le condensateur se décharge, correspondant approximativement à la période de la tension alternative redressée.) et que la chute de sa tension est inférieure à $\boldsymbol{\Delta V}$.

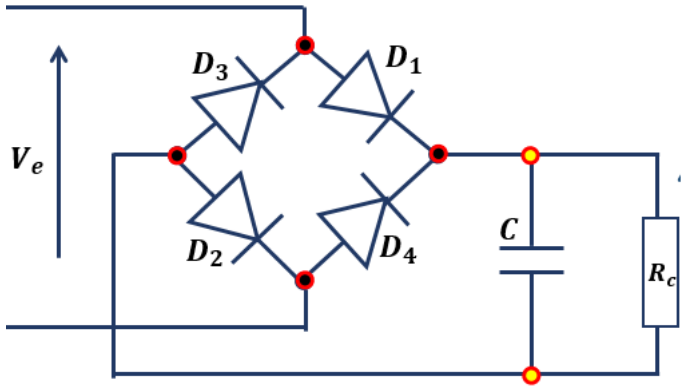
On a alors la relation :

$$C\Delta V = I_{max}\Delta T = \frac{I_{max}}{f_{red}}$$



$$C = \frac{I_{max}}{\Delta V f_e}$$

Redressement mono-alternance $T_{red} = T_e$

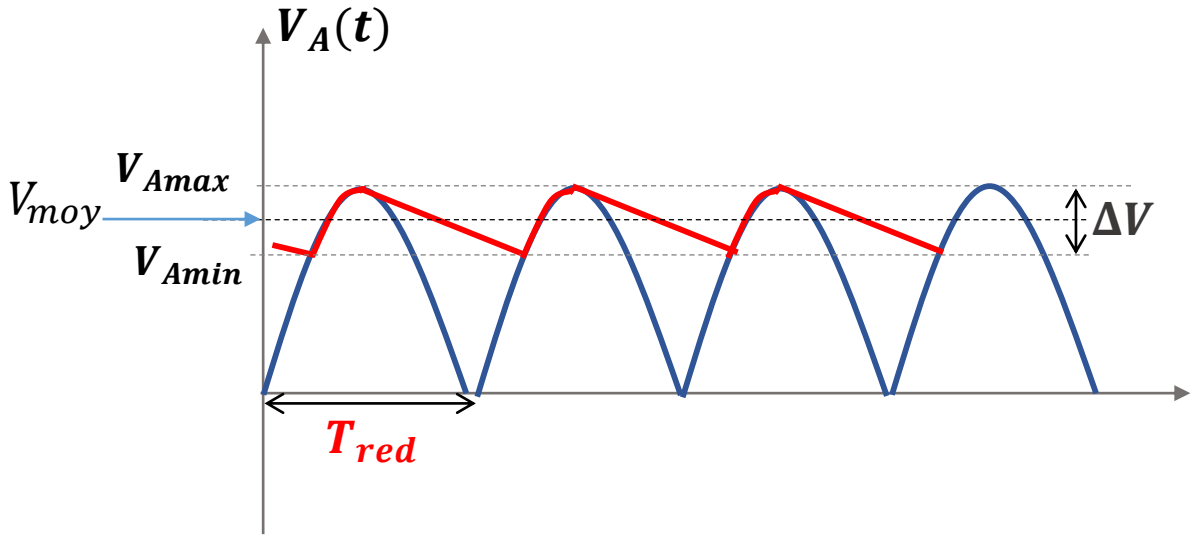


$$C = \frac{I_{max}}{2\Delta V f_e}$$

Redressement double-alternance $T_{red} = \frac{T_e}{2}$

❑ Filtrage

▪ Calcul de la capacité sans diode Zener



On a: $$C\Delta V = I_{max}\Delta T = \frac{I_{max}}{f_{red}}$$

$$Or, V_{max} = R_{ch}I_{max}$$

$$d'où : \Delta V = \frac{V_{max}}{R_{ch}Cf_{red}}.$$

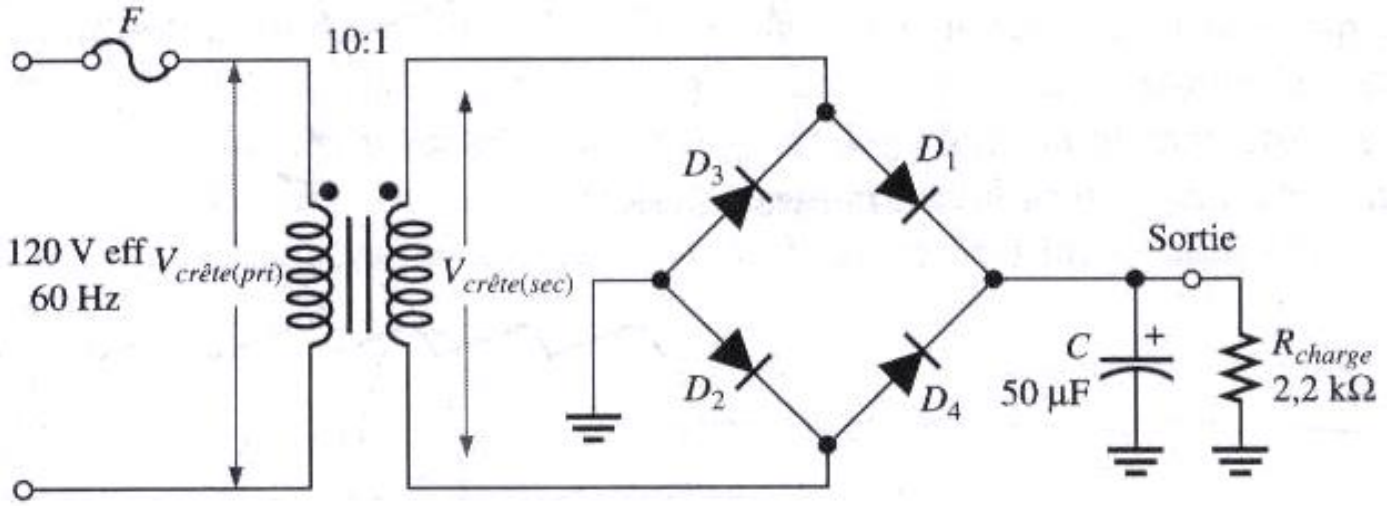
$$Ona : V_{moy} = V_{max} - \frac{\Delta V}{2}$$

$$V_{moy} = \left(1 - \frac{1}{2f_{red}R_{ch}C}\right)V_{max}$$

❑ Filtrage

Exemple:

Déterminez le coefficient d'ondulation du redresseur en pont de la **figure** ci-dessous.



Solution

❑ Filtrage

Solution

La tension crête du primaire est :

$$V_{max(pri)} = 1.414\ V_{eff} = (1,414)\ .\ 120\ \text{V} = \mathbf{170\ V}$$

La tension crête au secondaire est :

$$V_{max(sec)} = \left(\frac{N_{sec}}{N_{pri}}\right).V_{max(pri)} = \frac{1}{10}.170 = 17\ \text{V}$$

La tension crête redressée double alternance à l'entrée du filtre est :

$$\boldsymbol{V_{max(redr)} = V_{max(sec)} - 1,4\ \text{V}} = 17,0\ \text{V} - 1,4\ \text{V} = \mathbf{15,6\ V}$$

La fréquence de la tension redressée double alternance est de 120 Hz. La valeur crête-à-crête approximative de la tension d'ondulation à la sortie est :

$$\Delta V \cong \left(\frac{1}{f.R_{ch}.C}\right).V_{max} = \left(\frac{1}{(120\,\text{Hz}).(2,2\,\text{k}\Omega).(50\,\mu\text{F})}\right).15,6V = 1,18\text{V}$$

La valeur moyenne approximative de la tension de sortie est déterminée par :

$$V_{MOY} \cong \left(1 - \frac{1}{2f.R_{charge}.C}\right).V_{max(redr)} = \left(1 - \frac{1}{(240\,\text{Hz}).(2,2\,\text{k}\Omega).(50\,\mu\text{F})}\right).15,6\,V = 15\ \text{V}$$

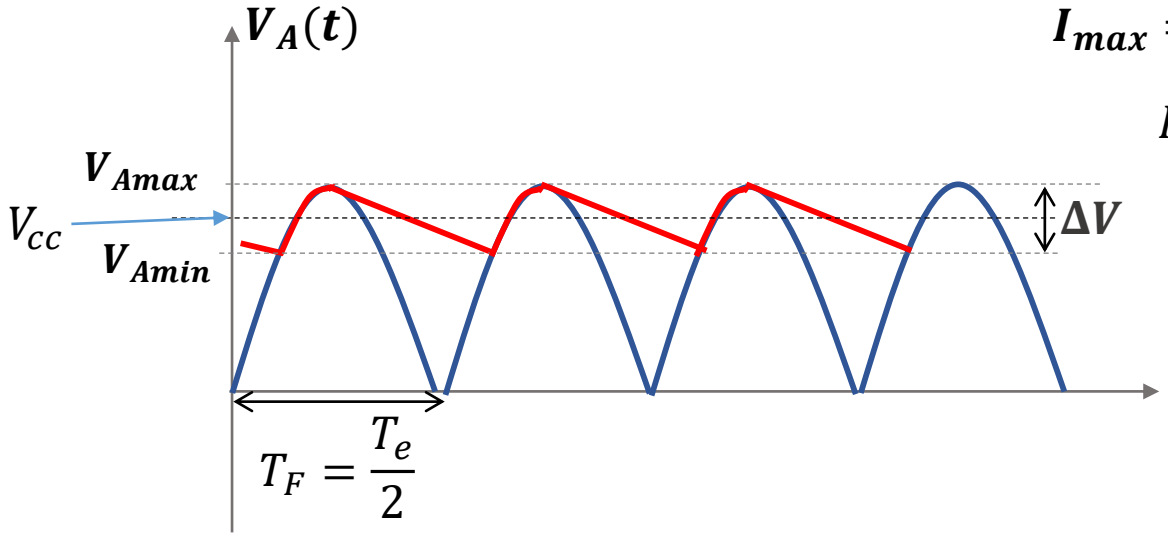
Le coefficient d'ondulation qui en résulte est :

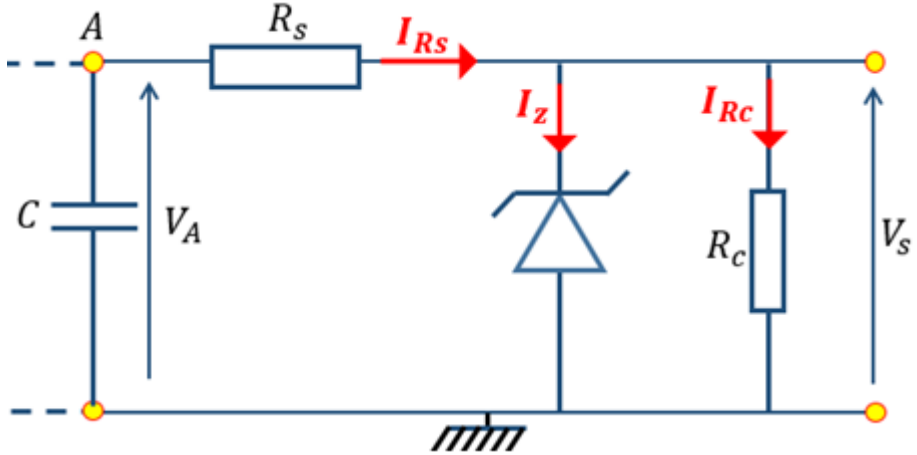
$$r = \frac{\Delta V}{V_{MOY}} = \frac{1,18\ \text{V}}{15\ \text{V}} = 0,079\ \text{V}$$

Le pourcentage d'ondulation est de **7,9%**.

❑ Filtrage

▪ Calcule du condensateur





▪ Calcul de la capacité avec diode Zener

Lorsque l'on **ajoute une diode Zener** avec sa **résistance de protection R_s**, le condensateur n'alimente plus seulement la charge, mais aussi la Zener. Ainsi, pendant la phase de décharge, le courant fourni par le condensateur devient :

$$I_{max} = I_{capa} = I_{Rs} = I_z + I_{R_c} \Rightarrow C\Delta V = (I_z + I_{ch})\Delta T$$

$$I_c = I_{Rs} = C\frac{\Delta V}{\Delta T} = C\frac{\Delta V}{T_{red}} = C\frac{\Delta V}{\frac{T_e}{2}} = 2f_e C\Delta V \Rightarrow \Delta V = \frac{I_{Rs}}{2f.C} \quad (1)$$

$$Or, V_{Amax} = R_s I_{Rs} + V_z = R_s I_{Rs} + V_{z0} + r_{z0} I_{Rs}$$

$$\Rightarrow V_{cmax} - V_{z0} = (R_s + r_{z0}) I_{Rs}$$

$$\Rightarrow I_c = I_{Rs} = \frac{V_{cmax} - V_{z0}}{R_s + r_{z0}} \quad (2)$$

D'après les deux équations (1) et (2):

$$\boldsymbol{C = \frac{V_{Amax} - V_{z0}}{2fe(R_s + r_{z0})\Delta V}}$$

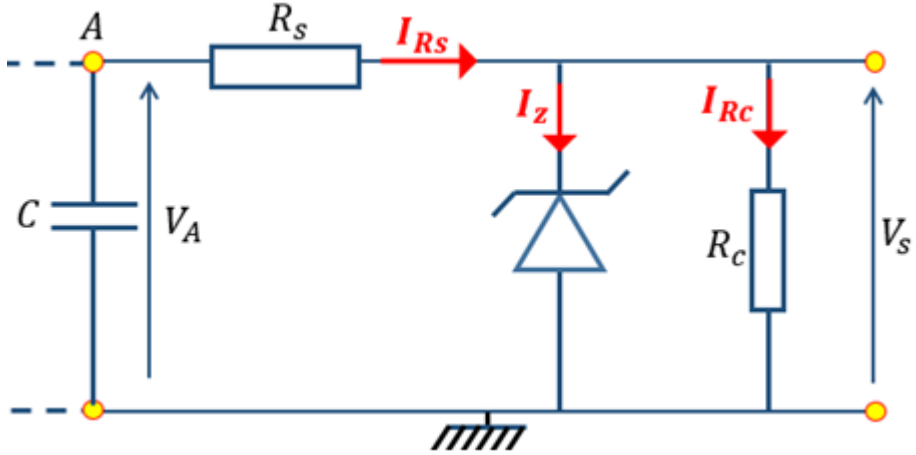
Tension moyenne: $V_{cc} = V_{Amax} - \frac{\Delta V}{2}$

Coefficient d'ondulation : $\rho = \frac{\Delta V}{V_{cc}}$

Exemple:

Déterminez la valeur de la capacité présenté dans la **figure** ci-dessous.

Soit le circuit:



Avec: $6V < VA < 8V$, $Rs = 100\ \Omega$, $V_{z0} = 3V$, Diode Zener($V_{z0} = 2V$, $r_{z0} = 2\Omega$), $fe = 50Hz$ et l'ondulation tolérée est $2V$

Solution

$C = 245\mu F$

Stabilisation de la tension par diode Zener

1. Introduction
2. Principe de fonctionnement de la diode Zener
3. Types de stabilisation par diode Zener
4. Description des deux types de stabilisation
    a. Stabilisation en amont: Calcul de la résistance série de protection $\boldsymbol{R_s}$
    b. Stabilisation en aval: Calcule de la résistance de charge $\boldsymbol{R_c}$

❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

1. Introduction

Dans les circuits électroniques, il est essentiel de garantir une tension d'alimentation stable malgré les fluctuations de la tension d'entrée ou les variations de la charge. Une tension instable peut perturber le fonctionnement des composants sensibles, notamment les circuits logiques et analogiques.

La **diode Zener** est un composant largement utilisé pour la **régulation de tension** grâce à sa capacité à maintenir une tension constante lorsqu'elle est polarisée en inverse. Son utilisation permet de compenser les variations de la source d'alimentation ou de la charge, assurant ainsi une meilleure stabilité du circuit.

2. Principe de fonctionnement de la diode Zener

Une diode Zener est une diode spéciale conçue pour fonctionner en **régime de polarisation inverse**. Contrairement à une diode classique, qui bloque le courant en inverse, la Zener laisse passer le courant lorsqu'une tension seuil appelée **tension Zener VZ** est atteinte.

❖ **Comportement de la Zener en inverse :**

- la diode est bloquée (très faible courant de fuite).
- la diode conduit et maintient une tension constante VZ
- le courant augmente mais la tension reste **quasi constante** tant que le courant ne dépasse pas la limite maximale admissible.

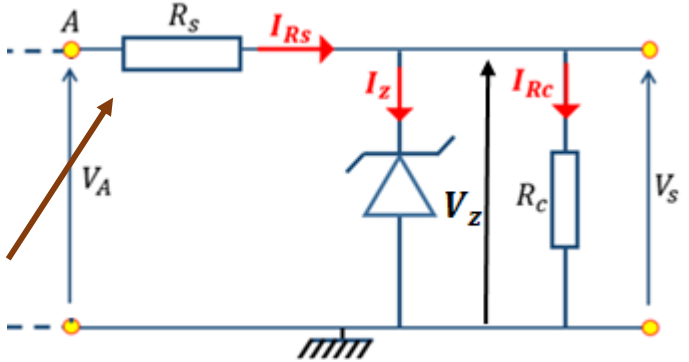
En exploitant cette propriété, la diode Zener est utilisée comme **régulateur de tension** en parallèle avec une charge, afin de maintenir une tension stable aux bornes du circuit d'alimentation.

❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

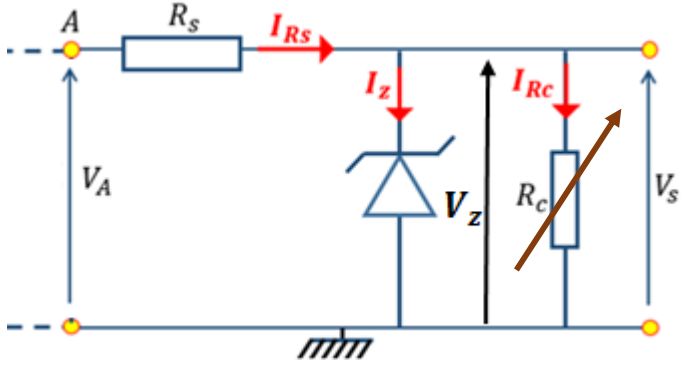
3. Types de stabilisation par diode Zener

La stabilisation de tension par diode Zener peut être étudiée sous deux aspects :

a. La stabilisation en amont, qui protège la charge contre les variations de la tension d'alimentation.



b. La stabilisation en aval, qui protège la source contre les variations de consommation de la charge.



Ces deux stabilisations sont complémentaires et permettent d'obtenir un circuit de régulation performant.

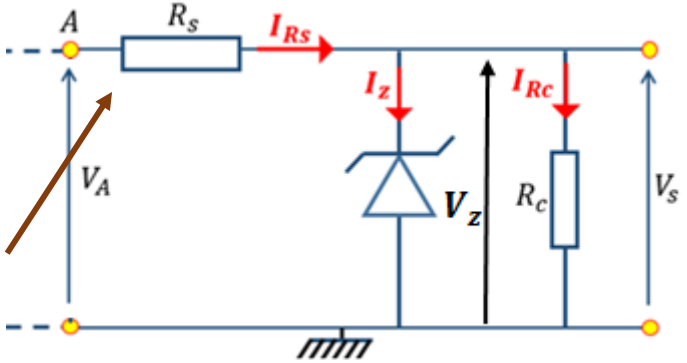
❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

4. Description des deux types de stabilisation

1. Stabilisation en amont: Régulation contre les variations de l'alimentation

La **stabilisation en amont** consiste à **protéger la charge contre les variations de la tension d'alimentation** (tension d'entrée). Ici, la tension redressée V_A après le filtrage peut fluctuer en fonction des variations de la tension secteur ou des tolérances du transformateur.

Avantage : Protège la charge contre les fluctuations de l'alimentation.



Objectif: L'étude en amont sert à **calculer R_s** pour absorber les variations de V_A et protéger la Zener.

Le choix de la résistance R_s est critique pour assurer le bon fonctionnement du régulateur basé sur la diode Zener. Cette résistance doit être calculée de manière à :

- ✓ Fournir un **courant minimal I_{zmin}** pour que la Zener reste dans sa zone de régulation.
- ✓ Limiter le **courant maximal I_{zmax}** afin d'éviter la destruction de la diode.

Le calcule de R_s se fait comme suit:

❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

❑ Calcul de R_{smax}, R_{smin}

d'après la loi d'ohm: on a: $V_A - V_z = R_s \times I_s$

Calcul de R_{smin} :

Quand V_A augmente, le courant I_{Rs} augmente $\Rightarrow V_z$ augmente $\Rightarrow R_s$ diminue

$$Alors, Si\ V_A = V_{Amax} \Rightarrow V_z = V_{zmax} \Rightarrow R_{smin} = \frac{V_{Amax} - V_{zmax}}{I_{zmax} + I_{Rcmin}}$$

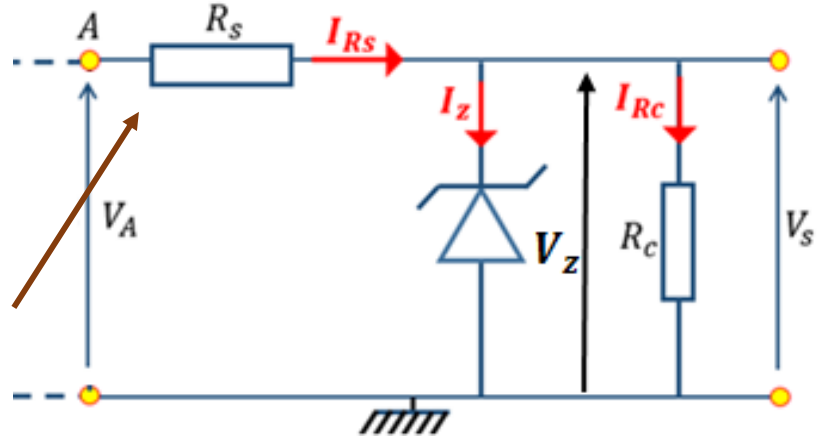
Calcul de R_{smax} :

Quand V_A diminue, le courant I_{Rs} diminue $\Rightarrow V_z$ diminue $\Rightarrow R_s$ augmente

$$Alors, Si\ V_A = V_{Amin} \Rightarrow V_z = V_{zmin} \Rightarrow R_{smax} = \frac{V_{Amin} - V_{zmin}}{I_{zmin} + I_{Rcmax}}$$

$$\begin{cases} R_{sMax} = \dfrac{V_{Amin} - V_{zmin}}{I_{zmin} + I_{Rc}} \\ R_{smin} = \dfrac{V_{Amax} - V_{zmax}}{I_{zMax} + I_{Rc}} \end{cases}$$

Pour la stabilisation en amont, on suppose que la résistance R_c de charge est constante, ce qui implique que le courant de charge reste inchangé. Par conséquent, lorsque la tension d'entrée est maximale, la diode Zener dérive un courant I_z plus important (tend vers I_{zmax}) pour maintenir une tension stable aux bornes de la charge. À l'inverse, lorsque la tension d'entrée diminue, le courant I_z se réduit (tend vers I_{zmin}), garantissant ainsi la régulation de la tension de sortie.



❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

Exercice

On dispose d'une source d'alimentation dont la tension d'entrée varie entre $\mathbf{9\ V}$ **et** $\mathbf{15\ V}$. On souhaite stabiliser cette tension à $\mathbf{5,5\ V}$ à l'aide d'une diode Zener pour alimenter une résistance de charge $\boldsymbol{Rc = 100\Omega}$.

1. Calculer le courant maximal **pouvant traverser la diode Zener**, sachant qu'elle peut dissiper au maximum
2. Déterminer la valeur de la résistance de protection $\boldsymbol{R_p}$ pour éviter de dépasser ce courant maximal.

Solution

1. Calcul du courant maximal $I_{Z_{max}}$

On utilise la relation de la puissance électrique :

$$P = V \times I$$

La puissance maximale que peut dissiper la diode est $P_{max} = 550$ mW, et sa tension est $V_Z = 5,5V$.

$$I_{Z_{max}} = \frac{P_{max}}{V_Z} = \frac{550 \times 10^{-3}}{5,5}$$

$$I_{Z_{max}} = 0,1A = 100mA$$

Donc, le courant maximal supporté par la diode est $100mA$.

Solution(suite)

2. Calcul de la résistance de protection R_P

La résistance de protection R_P sert à limiter le courant total du circuit. Le courant total fourni par la source d'alimentation est :

$$I_S = I_Z + I_C$$

où :

- I_Z est le courant dans la Zener, limité à $I_{Z_{max}} = 100mA$.
- I_C est le courant à travers la charge $R_C = 100\Omega$, donné par la loi d'Ohm :

$$I_C = \frac{V_Z}{R_C} = \frac{5,5}{100} = 0,055A = 55mA$$

Donc, **le courant total maximal I_S est :**

$$I_S = I_Z + I_C = 0,1 + 0,055 = 0,155A$$

La résistance de protection R_P est calculée en prenant la **tension la plus élevée de la source** (cas critique où $V_S = 15V$) :

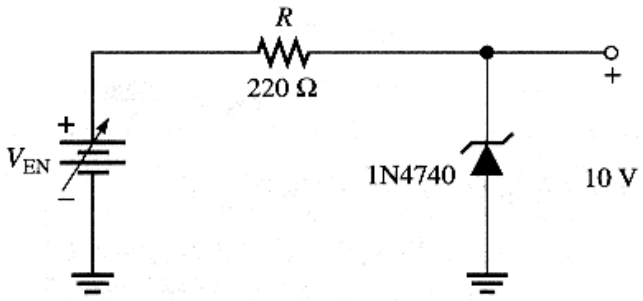
$$R_P = \frac{V_S - V_Z}{I_S} = \frac{15 - 5,5}{0,155}$$

$$R_P = \frac{9,5}{0,155} \approx 61,3\Omega$$

On choisit une **valeur normalisée** de $R_P = 62\Omega$.

Exemple :

Supposons que la ***Zener*** 1N4740 de **10 V** à la figure ci-dessus peut maintenir la régulation pour une échelle de courant *Zener* comprise entre I_{ZG} = **0,25 mA** et I_{ZM} = **100 mA** ($P_{D(max)}$ = **1 W**). L'**Impédance *Zener*** sera **négligée** dans les calculs.



Trouvons l'**intervalle de tension d'entrée** qui peut être **régulé** par cette ***Zener***.

Solution

Pour le **courant *Zener* minimal**, la tension V_R aux bornes de la **résistance** de **220 Ω** est :

$$V_R = I_{ZG}.R = (0,25\ mA).(220\ \Omega) = 55\ mV$$

Puisque $V_R \approx V_{EN} - V_Z$,

$$V_{EN(min)} \approx V_R + V_Z = 55\ mV + 10\ V = 10,055\ V$$

Pour le **courant *Zener* maximal**, la **tension V_R** aux bornes de la **résistance** de **220 Ω** est :

$$V_R = I_{ZM}.R = (100\ mA).(220\ \Omega) = 22\ V$$

Donc : $V_{EN(max)} \approx 22\ V + 10\ V = 32\ V$

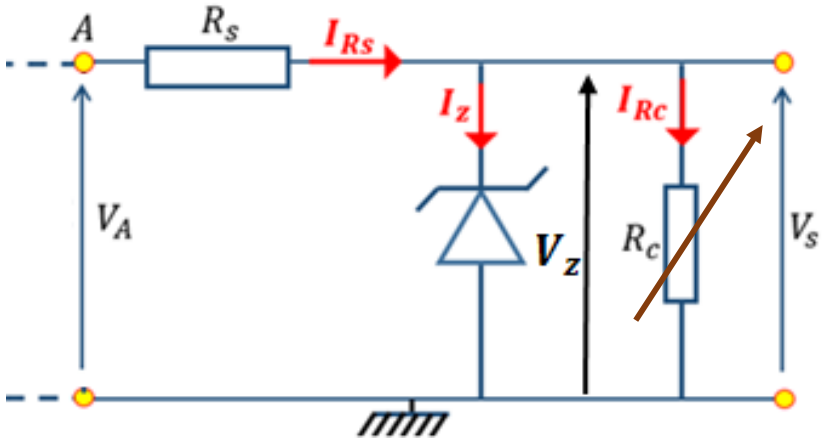
Ceci illustre que la **tension d'entrée régulée** par cette ***Zener*** est comprise **entre 10,055 V et 32 V** et maintenir une **tension de sortie** d'environ **10 V**.

La sortie variera légèrement autour de 10 V à cause de l'**Impédance *Zener***, dont la valeur a été **négligée** dans ces calculs.

❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

2. Stabilisation en aval: Régulation contre les variations de charge

La **stabilisation en aval** vise à **protéger l'alimentation contre les variations de la charge**. Ici, le courant consommé par la charge peut fluctuer, et on souhaite éviter que ces variations influencent la tension d'alimentation.



Avantage : Permet d'assurer une alimentation stable aux circuits sensibles.

Objectif : L'étude en aval sert à **calculer R_c** pour éviter que la consommation de la charge ne perturbe la régulation de la Zener.

Si le courant traversant la diode Zener devient trop faible (inférieur au courant de maintien I_{Zmin}), la diode sort de sa zone de régulation. Par conséquent, la tension à ses bornes n'est plus V_Z, et elle ne joue plus son rôle de stabilisation.

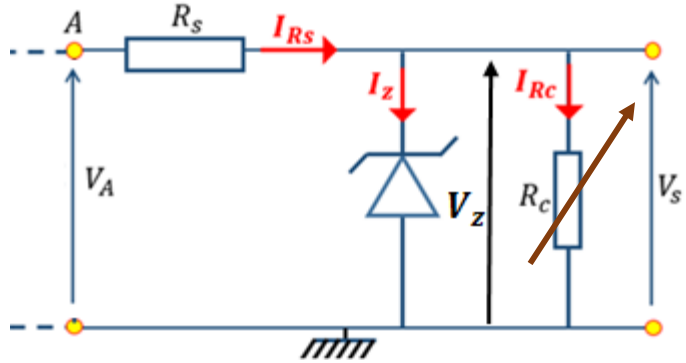
Si le courant traversant la diode devient trop important (supérieur au courant maximal I_{Zmax}), la diode risque de surchauffer et de s'endommager. Dans ce cas, elle peut griller, ce qui entraîne une perte de la régulation et une tension non contrôlée aux bornes de la charge.

Par conséquent, un bon calcul de la **résistance de charge** permet de **maintenir une tension stable égale à V_Z** en s'assurant que le courant traversant la diode Zener reste dans son **intervalle de régulation**. Cela garantit que la diode fonctionne correctement et stabilise la tension appliquée à la charge.

❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

Calcul de la résistance de charge R_c:

Pour la stabilisation en aval, on suppose que la tension d'alimentation en entrée $\boldsymbol{V_A}$ est constante, ainsi que la résistance série R_s, ce qui implique que le courant total $\boldsymbol{I_{R_s}}$ reste inchangé. Par conséquent, lorsque le courant $\boldsymbol{I_z}$ est maximal, le courant traversant la charge $\boldsymbol{I_c}$ est minimal, et inversement.



$$On\ \ a : R_c = \frac{V_z}{I_c} \quad avec:\ I_{cmin} < I_c < I_{cmax}$$

$$donc : \frac{V_z}{I_{cmax}} < R_c < \frac{V_z}{I_{cmin}}$$

$$Or : I_{R_s} = I_z + I_c \quad avec: \begin{cases} I_{R_s} = I_{zmax} + I_{cmin} \\ I_{R_s} = I_{zmin} + I_{cmax} \end{cases} \quad d'où : \begin{cases} I_{cmin} = I_{R_s} - I_{zmax} \\ I_{cmax} = I_{R_s} - I_{zmin} \end{cases}$$

$$Par\ conséquent, \quad \frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmin}} < R_c < \frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmax}}$$

$$\Rightarrow \quad \begin{cases} \boldsymbol{R_{cmin} = \dfrac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmin}}} \\ \boldsymbol{R_{cmax} = \dfrac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmax}}} \end{cases}$$

$$Le\ calul\ de\ I_{R_s}: \quad I_{R_s} = \frac{V_A - V_z}{R_s}$$

❑ Stabilisation de la tension par diode Zener

Exercice

Considérons le circuit régulateur Zener avec $V_e = 24V, V_z = 12V, I_{zmin} = 0{,}5mA \; et \; P_{zmax} = 250mW \; et \; Rs = 470$. Déterminer les résistances de charge minimale et maximale pour lesquelles la diode Zener maintiendra la régulation.

Solution

Le calcul de I_{zmax} : $I_{zmax} = \frac{P_{zmax}}{V_z} = \frac{250mW}{12V} = 20{,}83mA$

Le calcul de I_{R_s} : $I_{R_s} = \frac{V_A - V_z}{R_s} = \frac{12V}{470\Omega} = 25{,}53\ mA$

$$\left.\begin{array}{l} \boldsymbol{R_{cmax} = \frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmax}} = \frac{12}{25,53 - 20,83} = 2553\ \Omega} \\ \boldsymbol{R_{cmin} = \frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmin}} = \frac{12}{25,53 - 0,5} = 480\ \Omega} \end{array}\right\}$$

Par conséquent, $\frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmin}} > R_c > \frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmax}}$

Or : $I_{R_s} = I_z + I_c$ avec: $\left.\begin{array}{l} I_{R_s} = I_{zmax} + I_{cmin} \\ I_{R_s} = I_{zmin} + I_{cmax} \end{array}\right.$ d'où : $\left.\begin{array}{l} I_{cmin} = I_{R_s} - I_{zmax} \\ I_{cmax} = I_{R_s} - I_{zmin} \end{array}\right.$

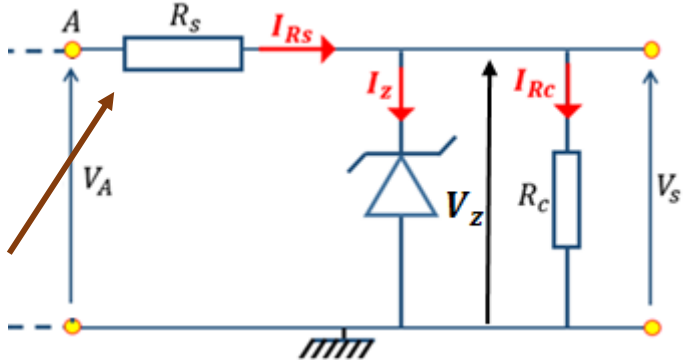
donc : $\frac{V_z}{I_{cmax}} > R_c > \frac{V_z}{I_{cmin}}$

On a : $R_c = \frac{V_z}{I_c}$ avec: $I_{cmin} < I_c < I_{cmax}$

Synthèse sur la diode Zener

Stabilisation en amont

Régulation contre les variations de l'alimentation



$$hypothèse: V_s = V_z = cst$$

$$V_A\ varie \longrightarrow I_{Rs}\ varie \quad et \quad R_c\ fixe \longrightarrow I_{Rc} = cst$$

$$Or, I_{R_s} = I_z + I_{Rc}$$

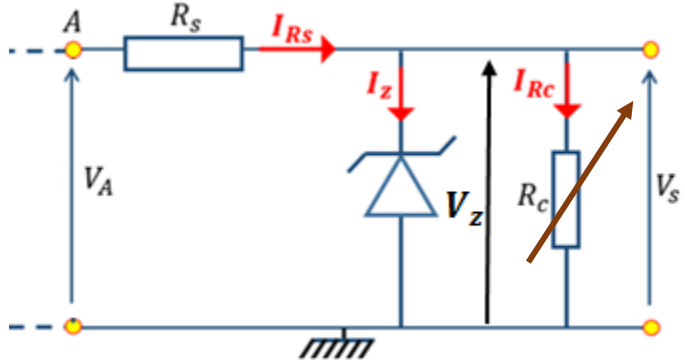
$Varie$ $Varie$ cst

$$d'où: \begin{cases} I_{R_s max} = I_{z max} + I_{Rc} \\ I_{R_s min} = I_{z min} + I_{Rc} \end{cases}$$

$$V_z = cst$$

Stabilisation en avale

Régulation contre les variations de charge



$$hypothèse: V_s = V_z = cst$$

$$V_A = cst \longrightarrow I_{Rs} = Cst \quad et \quad R_c\ varie \longrightarrow I_{Rc} = varie$$

$$Or, I_{R_s} = I_z + I_{Rc}$$

cst $Varie$ $Varie$

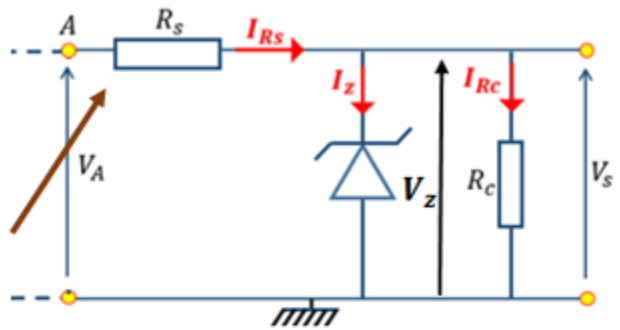
$$d'où: \begin{cases} I_{R_s} = I_{z max} + I_{Rc min} \\ I_{R_s} = I_{z min} + I_{Rc max} \end{cases}$$

$$V_z = cst$$

Synthèse

Stabilisation en amont

Régulation contre les variations de l'alimentation



$$V_s = V_z = cst$$

$$V_A\ varie \longrightarrow I_{Rs}\ varie \quad et \quad R_c\ fixe \longrightarrow I_{Rc} = cst$$

$$Or, I_{R_s} = I_z + I_{Rc}$$

$Varie$ $Varie$ cst

$$d'où: \begin{cases} I_{R_{smax}} = I_{zmax} + I_{Rc} \\ I_{R_s min} = I_{zmin} + I_{Rc} \end{cases}$$

$$V_z = cst$$

Méthodologie de calcul de R_{smin} et R_{smax}

Données : $V_{Amin}, V_{Amax}, I_{zmin}, I_{zmax}$ et $(R_c; V_z)$ fixes

$$On\ a : (R_c; V_z)\ fixes \Longrightarrow I_{R_c}\ fixe$$

❑ Calcul de R_{smax}, R_{smin}

d'après la loi d'ohm: on a: $V_A - V_Z = R_s \times I_s$

Calcul de R_{smin} :

Quand V_A augmente, le courant I_{Rs} augmente $\Rightarrow V_z$ augmente $\Rightarrow R_s$ diminue

$$Alors, Si\ V_A = V_{Amax} \Longrightarrow V_z = V_{zmax} \Longrightarrow R_{smin} = \frac{V_{Amax} - V_{zmax}}{I_{zmax} + I_{Rcmin}}$$

Calcul de R_{smax} :

Quand V_A diminue, le courant I_{Rs} diminue $\Rightarrow V_z$ diminue $\Rightarrow R_s$ augmente

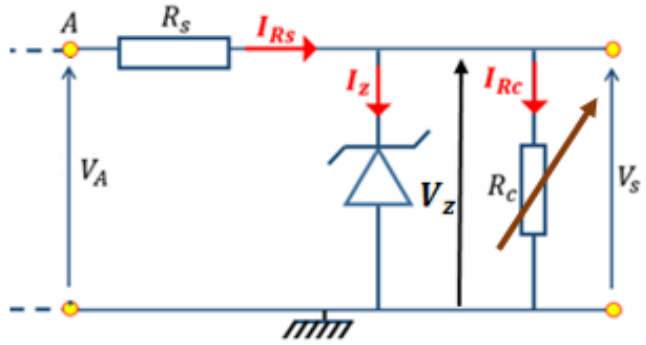
$$Alors, Si\ V_A = V_{Amin} \Longrightarrow V_z = V_{zmin} \Longrightarrow R_{smax} = \frac{V_{Amin} - V_{zmin}}{I_{zmin} + I_{Rcmax}}$$

Synthèse

$$\begin{cases} R_{sMax} = \dfrac{V_{Amin} - V_{zmin}}{I_{zmin} + I_{Rc}} \\ R_{smin} = \dfrac{V_{Amax} - V_{zmax}}{I_{zMax} + I_{Rc}} \end{cases}$$

Stabilisation en avale

Régulation contre les variations de charge



$$V_s = V_z = cst$$

$$V_A = cst \longrightarrow I_{Rs} = Cst \quad et \quad R_c\ varie \longrightarrow I_{Rc} = varie$$

$$Or, I_{R_s} = I_z + I_{Rc}$$

cst $\quad$ $Varie$ $\quad$ $Varie$

$$d'où: \begin{cases} I_{R_s} = I_{zmax} + I_{Rcmin} \\ I_{R_s} = I_{zmin} + I_{Rcmax} \end{cases}$$

$$V_z = cst$$

Méthodologie de calcul de R_{cmin} et R_{cmax}

Données : $(V_A, R_s, V_z) fixe, I_{zmin}\ et\ I_{zmax}$

$$Ona : (V_A, R_s) fixe \Longrightarrow I_{R_s} fixe$$

$$On\ a : R_c = \frac{V_z}{I_c} \quad avec:\ I_{cmin} < I_c < I_{cmax}$$

$$donc : \frac{V_z}{I_{cmax}} < R_c < \frac{V_z}{I_{cmin}}$$

$$Or : I_{R_s} = I_z + I_c \quad avec: \begin{cases} I_{R_s} = I_{zmax} + I_{cmin} \\ I_{R_s} = I_{zmin} + I_{cmax} \end{cases} \quad d'où : \begin{cases} I_{cmin} = I_{R_s} - I_{zmax} \\ I_{cmax} = I_{R_s} - I_{zmin} \end{cases}$$

$$Par\ conséquent, \quad \frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmin}} < R_c < \frac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmax}}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{R_{cmin} = \dfrac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmin}}} \\ \boldsymbol{R_{cmax} = \dfrac{V_z}{I_{R_s} - I_{zmax}}} \end{cases}$$

$$Le\ calul\ de\ I_{R_s}: \quad I_{R_s} = \frac{V_A - V_z}{R_s}$$

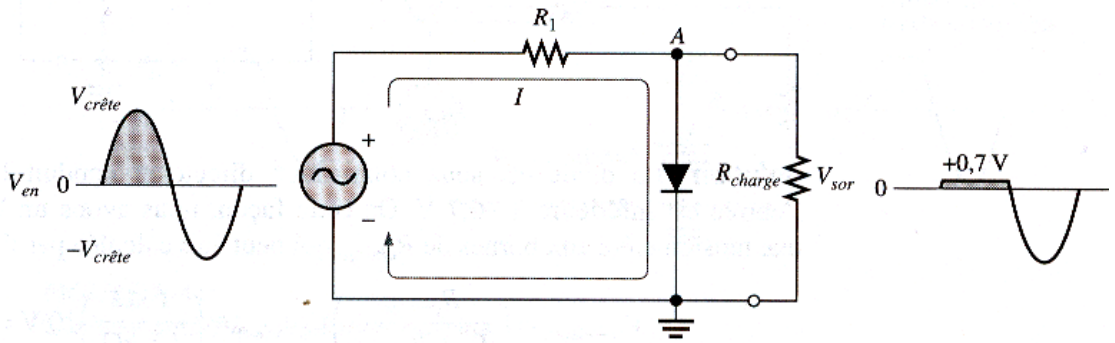
Synthèse

Autres applications

1. Circuits limiteurs à diode (Ecrêtage de tension)
2. Circuits de restauration (Décalage de tensions)

❑ Circuits limiteurs à diode (Ecrêtage de tension)

Limiteur Positif : **Limite** ou **Ecrête** la portion **Positive** du signal d'**entrée**.



Circuit **limiteur** d'une alternance **positive**

Alt. **(+)** : D en polarisation **Directe** et
Alt. **(-)** : D en polarisation **Inverse**.

Cathode à la masse (**0 V**)

Si V_{en} > **0,7 V**.

⇒ Anode ne peut excéder **0,7 V**.

Point ***A*** limité à **+0,7 V**

Si V_{en} < **0,7 V**

⇒ D passe en polarisation **Inverse** ⇒ Circuit **ouvert**.

⇒ **Sortie identique** à tension d'entrée,

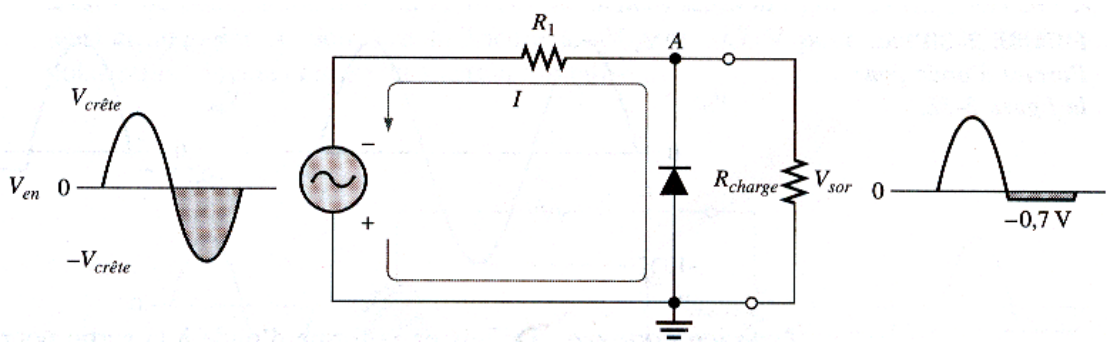
Sauf que **Amplitude** déterminée par le **Diviseur de Tension** donné par R_1 et R_{charge} :

$$V_{sor} = \left(\frac{R_{charge}}{R_1 + R_{charge}} \right) V_{en}$$

Si $R_1 \ll R_{charge}$ ⇒ $V_{sor} = V_{en}$

❑ Circuits limiteurs à diode (Ecrêtage de tension)

Limiteur Négatif (Pivote la diode**)** : **Limite** ou **Ecrête** la portion **Négative** du signal d'**entrée**.



Circuit **limiteur** d'une alternance **négative**

Alt. **(-)** : D en polarisation **Directe** et
Alt. **(+)** : D en polarisation **Inverse**.

Anode à la masse (**0 V**)

Si V_{en} < **-0,7 V**.

⇒ Cathode maintenue à **-0,7 V**.

Point ***A*** limité à **-0,7 V**

Si V_{en} > **-0,7 V**

⇒ D passe en polarisation **Inverse** ⇒ Circuit **ouvert**.

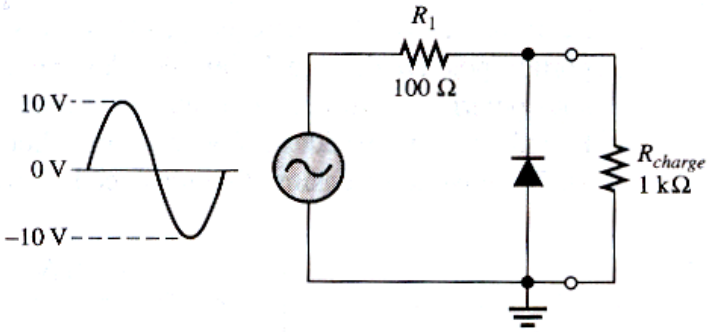
⇒ **Sortie identique** à tension d'entrée,

Sauf que **Amplitude** déterminée par le **Diviseur de Tension** donné par R_1 et R_{charge}

❑ Circuits limiteurs à diode (Ecrêtage de tension)

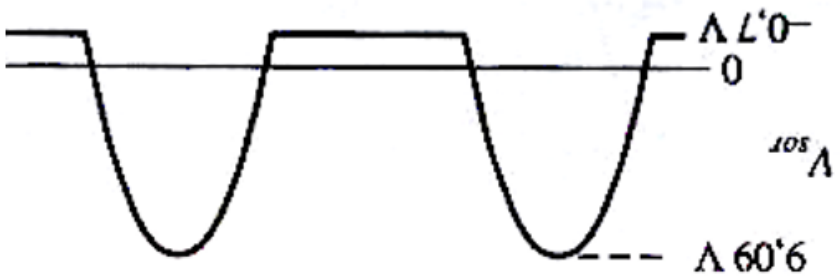
Exemple :

Que lirez-vous sur l'oscilloscope relié à R_{charge}, dans le circuit limiteur illustré à la figure ci-dessous ?



Solution:

L'oscilloscope affichera à la sortie :



$$V_{crête(sor)} = \left(\frac{R_{charge}}{R_1 + R_{charge}}\right) V_{crête(en)} = \left(\frac{1\ k\Omega}{1,1\ k\Omega}\right) 10\ V = 9,09\ V$$

➔ **Limiteur négatif** avec Tension crête aux bornes de R_{charge} :

Polarisée en **directe**, si la tension entre ses bornes est inférieure à -0,7 V.

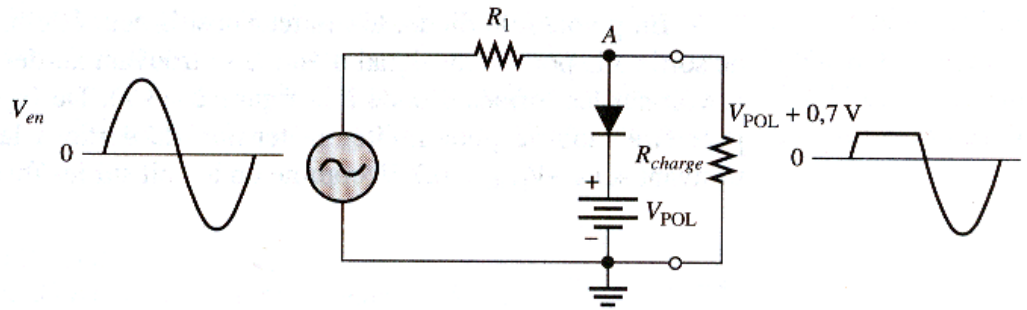
❑ Circuits limiteurs à diode (Ecrêtage de tension)

Limiteurs polarisés

Ajoute une tension de polarisation, V_{POL}, en **série** avec la diode

⇒ **Ajuste le niveau** auquel une **tension c.a. sera limitée.**

Limiteur Positif



Circuit **limiteur** en polarisation **positive**

En polarisation **Directe** D **ne devient Conductrice** que **SI** $V_A \geq (V_{POL} + 0,7\ V)$.

Si D **Conduit**, V_A est **limitée à** $(V_{POL} + 0,7\ V)$

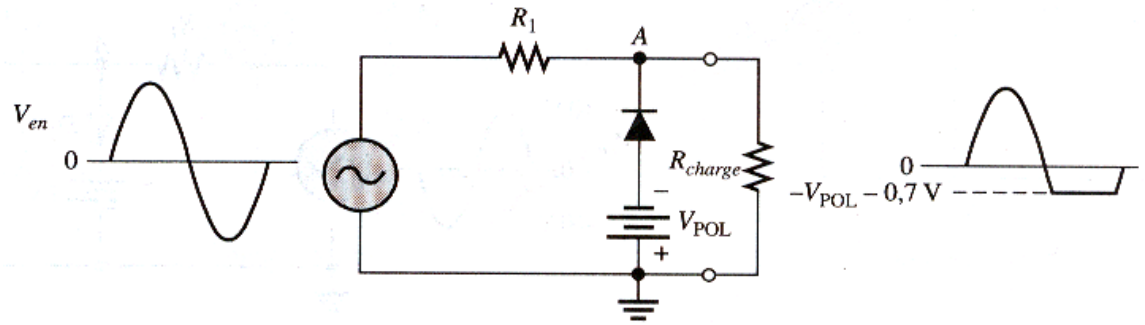
⇒ ∀ $V_{en} > (V_{POL} + 0,7\ V)$ → V_{sor} **Tronquée** ou coupée ($V_{Rcharge}$=V_{pol} +0,7V).

❑ Circuits limiteurs à diode (Ecrêtage de tension)

Limiteurs polarisés

Limiteur Négatif : Limiter tension de sortie **au-dessous** d'un **niveau négatif** donné

← **Diode** et **Générateur** de polarisation V_{POL} **branchées** selon la **figure** ci-dessous:



Circuit **limiteur** en polarisation **négatif**

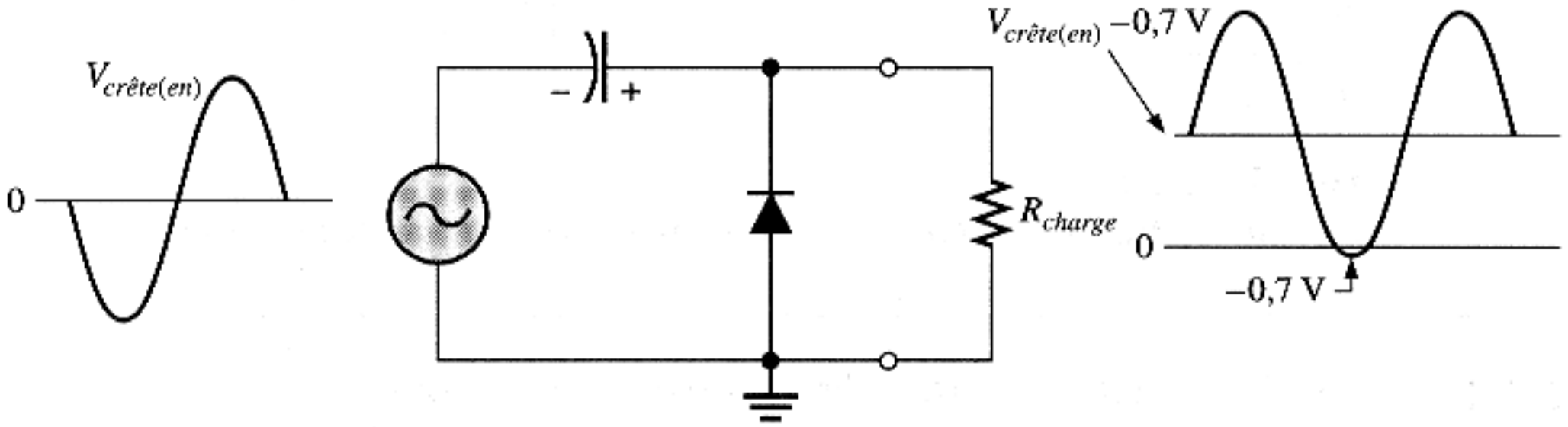
SI $V_A > (-V_{POL} - 0{,}7\ V)$

⇒ Met la **Diode** en **polarisation Directe** et amorcer l'action limitative.

($V_{Rcharge} = -V_{pol} - 0{,}7V$)

❑ Circuits de restauration (Décalage de tension)

Il permet d'**ajouter** une tension continue au signal alternatif d'entrée

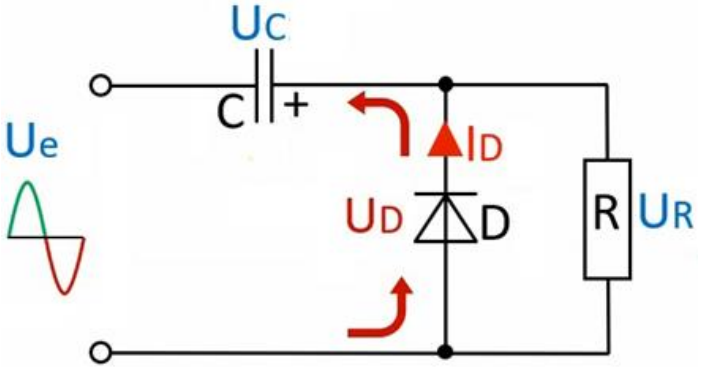


Circuit de **fixation Positif**

Si on **pivote la diode**, une **tension négative** sera **ajoutée** à V_{en}

❑ Circuits de restauration (Décalage de tension)

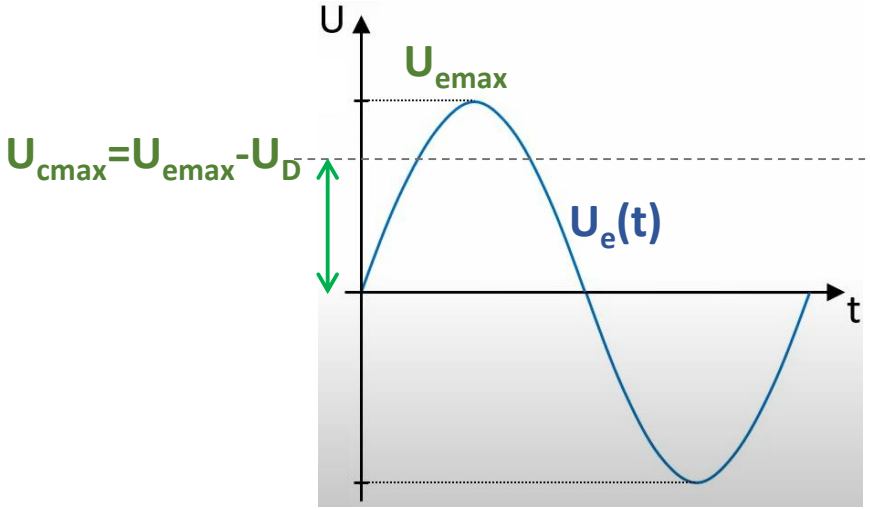
Pendant l'alternance négative



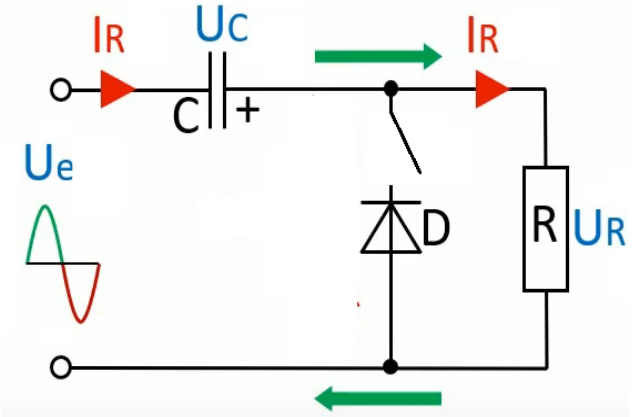
D en polarisation **Directe**

⇒ **Condensateur se charge** à un niveau proche de U_{emax} **soit :**

$$U_{cmax}=U_{emax}-U_D$$



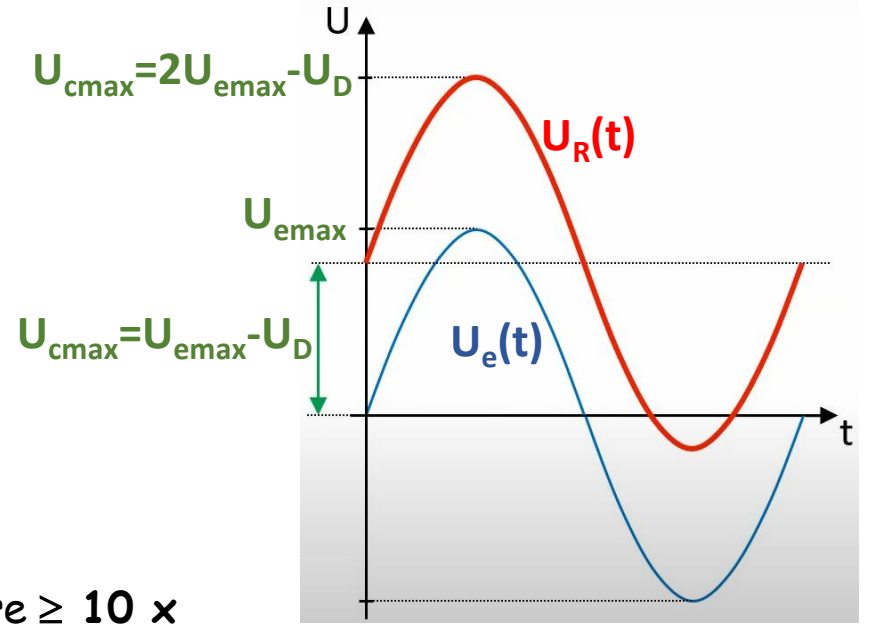
Pendant l'alternance positive



D en polarisation **inverse**

⇒ **Condensateur se décharge** à travers la résistance et que la tension Ucmax s'aditionne à Uemax **soit :**

$$U_{Rmax}=U_{emax}+U_{cmax}=2U_{emax}-U_D$$



Pour un **effet de restauration efficace, la constante de temps** τ = ***RC*** devra être ≥ **10 x la période** de la signal **d'entrée.**

Fin du chapitre 1